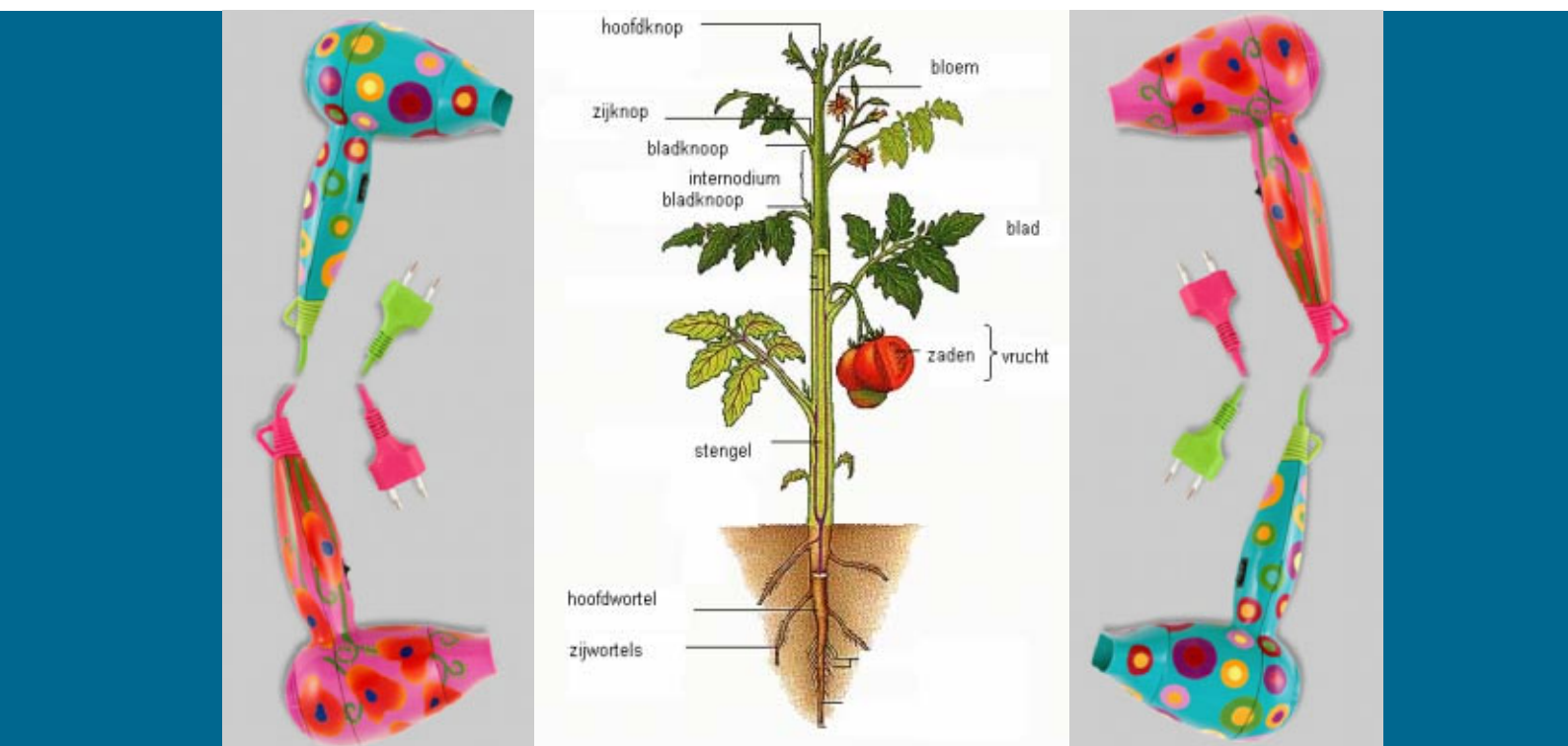


Nieuwe vormen van verwarming van gewas(delen)

R.E.E. Jongschaap, A. de Gelder, E. Heuvelink, F.L.K. Kempkes & C. Stanghellini



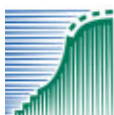


Nieuwe vormen van verwarming van gewas(delen)

R.E.E. Jongschaap, A. de Gelder, E. Heuvelink, F.L.K. Kempkes & C. Stanghellini

© 2009 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Wageningen UR Glastuinbouw



**landbouw, natuur en
voedselkwaliteit**



Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 48 05 00
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	pagina
Samenvatting	1
1 Inleiding	3
1.1 Probleemstelling	3
1.2 Doelstellingen en toepassingstermijn	4
1.2.1 Energiedoelstelling	4
1.2.2 Technische doelstellingen	4
1.2.3 Nevendoelstellingen	4
2 Temperatuureffect op gewasgroei en –ontwikkeling	5
2.1 Wortel	7
2.2 Stengel	10
2.3 Blad	13
2.4 Groeipunt	15
2.5 Bloem	15
2.6 Vrucht en zaad	16
2.7 Samenvatting expertkennis en beoordeling van de literatuur	17
2.7.1 Temperatuur	17
2.7.2 Luchtvochtigheid	18
2.8 Discussie	18
2.9 Conclusies	20
3 Verkenning van verwarmingssystemen	21
3.1 Warmteoverdracht	21
3.2 Warmteoverdracht bij kasgewassen	21
3.2.1 Basisprincipes	21
3.2.2 Semigesloten teelten	24
3.3 Alternatieve vormen van verwarming	24
3.3.1 Brainstorm	25
3.3.2 Discussiestellingen	26
3.4 Modelaanpassing	26
3.5 Conclusies en simulatiescenario's	27
4 Berekeningen met alternatieve verwarmingssystemen	29
4.1 Kaspro - berekeningen energieverbruik van alternatieve verwarmingssystemen	29
4.1.1 Alternatieve verwarming tomaat	29
4.1.2 Alternatieve verwarming roos	33
4.1.3 Alternatieve verwarming Spathiphyllum	41
4.2 Samenvatting en discussie alternatieve vormen van verwarming	44
5 Conclusies	47
6 Aanbevelingen	49
7 Referenties	51

8	Bijlagen	57
8.1	Referentieteelten en referentieverwarming	57
8.1.1	Tomaat	57
8.1.2	Roos	59
8.1.3	Spathiphyllum	60
8.2	Berekeningen van energiegebruik van referentieteelten	61
8.2.1	Referentieteelt tomaat	61
8.2.2	Referentieteelt roos	63
8.2.3	Referentieteelt Spathiphyllum	66
8.3	De modelberekeningen in vogelvlucht	68
8.4	Populaire publicaties	73
8.5	Relatiediagram temperatuursinvloed op de groei van een kasgewas	75

Samenvatting

Verwarming in de glastuinbouw is er op gericht om het gewas te verwarmen zodat het goed groeit en zich goed kan ontwikkelen. Op het ogenblik vindt het grootste deel van de gewasverwarming plaats door het verwarmen van de kaslucht die het gewas omringt. De kaslucht staat in direct contact met zowel het gewas als de bodem, de gevel en het kasdek en verliest op die manier energie naar de omgeving. Bovendien worden gewasdelen verwarmd die deze warmtebehoefte misschien niet hebben. Als de kasluchttemperatuur verlaagd kan worden terwijl de gewasgroei en gewasontwikkeling door een directe verwarming van gewasdelen op peil kan blijven, betekent dit energiebesparing. Een literatuurstudie en modelberekeningen laten zien wat de mogelijkheden zijn.

In de literatuurstudie wordt ingegaan op de temperatuurrespons van verschillende gewasonderdelen van de gewasgroepen vruchtgroenten, snijbloemen en potplanten. Op basis van literatuur is een inschatting gemaakt welke gewasdelen op welk moment al dan niet verwarmd zouden moeten worden en waar mogelijk energiebesparing mogelijk is door slechts een deel van het gewas, of een gedeelte van de teelt te verwarmen. Vervolgens wordt ingegaan op welke manier de huidige uitrusting van de kassen het verwarmen van gewasdelen mogelijk maakt, en hoe deelverwarming te realiseren zou zijn.

Op basis van de literatuur is de conclusie dat de temperatuur van blad en stengel wel wat lager kan. Op het ogenblik is de aangehouden kasluchttemperatuur geoptimaliseerd voor verschillende processen die tegelijkertijd plaatsvinden (bijv. afsplitsingsnelheid van bladeren en bloemen en de uitgroei van organen) en voor het handhaven van de 'sink'-sterkte van bepaalde organen. Hierdoor worden andere plantendelen meer of langer dan nodig verwarmd. Bij een verlaagde kasluchttemperatuur kan de temperatuur van blad en stengel ook omlaag, zonder dat de productie achteruit gaat en/of de kans op natslag vergroot wordt. Wel is het nodig om door middel van specifieke verwarming de temperatuur van groeipunten zo af te stemmen dat de afsplitsingsnelheid van bladeren en bloemen op peil gehouden wordt. Specifieke bloem- en/of vruchtverwarming kan dan de 'sink'-sterkte sturen die nodig is om de kwantiteit en de kwaliteit van de productie te handhaven. De worteltemperatuur zou verlaagd mogen worden tot een niveau waarop de groei en ontwikkeling van de wortels optimaal zijn en de aanmaak van hormonen niet gehinderd wordt.

Uit het literatuuronderzoek blijkt verder dat de beschikbare kennis van groei- en ontwikkelingsprocessen onvolledig is om de gevolgen te voorspellen van een ongebalanceerde verwarming van (verschillende) gewasdelen. De effecten op productie (kwantiteit en kwaliteit) zouden nader onderzocht moeten worden als het mogelijk wordt deelverwarming toe te passen, ook op een hoger niveau dan een solitaire plant.

Op dit moment bestaat er geen verwarmingssysteem dat een gerichte energiebundel zou kunnen opleveren zonder negatieve gevolgen op de lichtonderschepping. De te behalen energiebesparing is (theoretisch) zo groot als de verliezen die optreden door warmte-uitwisseling van het gewas met de omgeving. Groeipuntverwarming zonder warmteverlies is vanwege de dimensies en vochtinhoud van de groeipunten verwaarloosbaar klein ten opzichte van de verwarming van andere plantendelen zoals de wortels en de vruchten. Bladeren zouden alleen verwarmd hoeven worden voor het realiseren van de gewenste ontwikkelingsnelheid en dimensies, waarna koeler geteeld kan worden. Zoals aangetoond in eerdere studies is per 1 °C gemiddelde setpoint verlaging een energiebesparing van ca. 8% te behalen (Dueck *et al.*, 2004a; Dueck *et al.*, 2004b).

Voor het doorrekenen van het energieverbruik van verschillende vormen van verwarming zijn referentieteelten vastgesteld. Hiervoor zijn voorbeeldgewassen gekozen uit elk van de gewasgroepen: tomaat voor de vruchtgroenten, roos voor de snijbloemen en *Spathiphyllum* voor potplanten. In een brainstorm met experts is een aantal alternatieve verwarmingssystemen naar voren gekomen, waaruit een keuze is gemaakt om met het kasklimaatmodel KASPRO door te kunnen rekenen op energieverbruik. In de huidige kas- en gewasmodellen bestaat niet de mogelijkheid om binnen een gewas op onderdelen met verschillende temperaturen te rekenen. Het model KASPRO simuleert conform de praktijksituatie een homogene gewas temperatuur en is gevalideerd voor reële situaties waarin de klimaatregeling (inclusief temperatuur) op het gehele gewas en de kaslucht plaatsvindt. Het effect van verschillende

stralings- en verwarmingsbronnen wordt daarbij berekend en aangepast aan het externe condities zoals de buiten-temperatuur. De stuurmogelijkheden die in het model worden gebruikt zijn dus in overeenstemming met de praktijk-situatie waarin een tuinder probeert zijn gewastemperatuur te handhaven.

Om tot inzicht te komen in de mogelijkheden voor deelverwarming is in deze studie is gekozen voor de inzet van een zgn. 'energie-infuus', waarmee het gewas direct de benodigde energie aangevoerd krijgt die het nodig heeft om de gewastemperatuur uit een referentieteel aan te houden. Hierdoor wordt een 'ideale' belichting en verwarming gesimuleerd, die in de praktijk nog niet voorhanden is.

Door de inzet van het 'energie-infuus' wordt de gewenste verlaging van de kasluchttemperatuur bereikt, maar moet er toch meer energie gestoken worden in de andere verwarmingsbronnen om de gewastemperatuur (op onderdelen) op het referentieniveau te houden. Het belangrijkste resultaat van deze aanpak laat zien dat er door de inzet van de huidige kasuitrusting en technologieën, en zelfs met een zeer efficiënt energie-infuus, geen significante daling van het energieverbruik verwacht mag worden als er geen isolatie van vloer, gevel en kasdek plaatsvindt. De grootste additionele verliespost die optreedt is het verlies van warmte naar de bodem, waarvoor investeringen nodig zijn om deze te beperken (isolatie). Verliesposten worden verder veroorzaakt door een grotere verdamping door een toegenomen temperatuurverschil tussen gewas en kaslucht en een inefficiënte onderschepping van de alternatieve straling door gewaseigenschappen die vooral gelden in een rijgewas. Door straalverwarming en het grotere temperatuurverschil tussen gewas en kaslucht is de kans op natslag geringer, waardoor 'vochtiger' telen mogelijk is, met de bijbehorende energiebesparing.

Om aan te tonen of de wijze van energietoediening (conventionele convectie/straling en 'energie-infuus') van invloed is, en wat de energiebesparing zou kunnen zijn, zijn een tweetal situaties doorgerekend voor een donkere, koude nacht in april (met en zonder scherm). Uit de berekeningen blijkt dat in zo'n situatie een besparing van 5% mogelijk is als er niet geschermd wordt. Bij het sluiten van de schermen loopt de besparing terug naar 3% en wordt verder geminimaliseerd als het gehele groeiseizoen in ogenschouw wordt genomen.

In conclusie: theoretisch lijkt energiebesparing mogelijk door het verwarmen van gewasdelen, waarbij het mogelijk moet zijn om productiekwaliteit en productiekwantiteit te handhaven. Het blijft echter de vraag hoe een gewas in de praktijk zal reageren op deelverwarming. De huidige kasuitrusting is niet ingericht is op het realiseren van deelverwarming zonder verlies aan PAR zodat innovaties en nieuwe technologieën nodig zijn. Omdat er voor gewas (deel-)verwarming nog een groot gat bestaat tussen de theoretische mogelijkheden en de haalbaarheid in de praktijk-situatie, zijn de aanbevelingen:

- De uitvoering van experimenten naar de effecten van deelverwarming van gewasdelen voor verschillende kasgewassen
- Onderzoek naar optimale groeipunttemperatuur voor juiste afsplitsingsnelheden van bladeren en (bloem-)stengels
- Onderzoek naar technische mogelijkheden van efficiënte groeipuntverwarming zonder verlies van PAR

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling

Verwarming in de glastuinbouw moet het liefst direct het gewas bereiken en niet via de kaslucht. Dit laatste kost in principe onnodige energie. De kaslucht staat in direct contact met zowel het gewas als het kasdek en via het dek verliest de kas energie naar de omgeving. Als de kasluchttemperatuur verlaagd kan worden terwijl de gewasgroei en gewasontwikkeling door een directe verwarming van de gewasdelen op peil kan blijven betekent dit een energiebesparing. De relatie tussen temperatuursom en de uitgroeiduur van vruchten of bloemen of de ontwikkelingsnelheid van primordia is beter te beschrijven op basis van planttemperatuur dan op basis van kasluchttemperatuur (Shimizu en Heins, 2002; Baas *et al.*, 2002).

Onderzoek van o.a. de Rijksuniversiteit Groningen duidt er op dat tomatenplanten bij lagere ruimtetemperatuur geteeld zouden kunnen worden als de worteltemperatuur verhoogd wordt (Venema, 2001). Verlaging van de ruimtetemperatuur met gelijktijdige verwarming van substraat zou een aanzienlijke energiebesparing bij substraatteelten kunnen opleveren. Ook in meer recente projecten is aangetoond dat het gebruik van matverwarming een positieve invloed heeft als de optimale ruimtetemperatuur niet gerealiseerd kan worden of als door koeling van de lucht onderin de kas de worteltemperatuur (te) laag blijft (Kaarsemaker en van Telgen, 2006). Veelal leidt een verhoging van de temperatuur van een plantenorgaan tot een snellere ontwikkeling en tot een hogere 'sink'-sterkte. Dit laatste wil zeggen dat het sterker assimilaten naar zich toe trekt. Als alle plantenorganen tegelijk in temperatuur stijgen kan het netto effect op assimilatenverdeling beperkt zijn. Echter als een bepaald orgaan verwarmd wordt terwijl de rest van de plant op de lagere temperatuur blijft, gaan er relatief meer assimilaten naar het orgaan met de verhoogde temperatuur.

Temperatuurverdeling in het gewas kan niet los gezien worden van vochtverdeling. Vochtigheid speelt een belangrijke rol bij de ontwikkeling van verschillende schimmelziekten, waarbij bepaalde plantendelen gevoeliger zijn dan andere plantendelen. Bij vruchtgroenten zijn bijvoorbeeld de stengelwonden die ontstaan bij bladplukken kwetsbaar voor Botrytis.

Niet alle plantendelen (wortel, stengel, blad, vrucht, bloem, knop, groeipunt) reageren op gelijke wijze op een temperatuursverandering. Er ligt een uitdaging om gebruik te maken van de temperatuur- en vochtresponse van de verschillende plantendelen om middels alternatieve verwarmingssystemen deze effecten gunstig te benutten. Daarmee moet energie worden gespaard en de productie beter gestuurd. Om de haalbaarheid van deze gedachte te toetsen wordt deze deskstudie uitgevoerd die uit vier onderdelen bestaat.

- Een literatuurstudie naar de effecten van temperatuur op groei en ontwikkeling van de verschillende plantendelen en het schetsen van een samenhang daartussen. Deze studie moet aangeven waar de kansen voor verwarming van gewasdelen fysiologisch liggen. Voor verschillende gewasgroepen, zoals vruchtgroenten, snijbloemen en potplanten wordt op basis van literatuur en op basis van kennis en ervaringen van de betrokken onderzoeksinstituten een fysiologische beschrijving gegeven van de respons van de verschillende plantorganen op temperatuur. Op basis van gewasbehoeften wordt een schets gemaakt van de meest ideale temperatuurverdeling voor de verschillende gewasgroepen.
- Identificatie van systemen om gewasdelen te verwarmen. Dit kunnen zowel bestaande als gewenste systemen zijn. Door middel van een brainstormbijeenkomst met een aantal onderzoekers wordt nagegaan hoe de plant op andere manieren verwarmd kan worden. Hierbij is onderscheid gemaakt naar verschillende gewasgroepen en verschillende energiebronnen (met name het onderscheid tussen hoog- en laagwaardige energie).
- Een simulatiestudie naar de energiebesparing van verwarming van gewasdelen. Voor de meest perspectievolle systemen van gewasverwarming is een schatting gemaakt van de mogelijke energiebesparing. Het model KASPRO is gebruikt om te rekenen met de mogelijkheden van alternatieve verwarmingsvormen binnen huidige kasuitrustingen. Als het model een bepaalde manier van verwarming niet kan beschrijven en dus niet kan berekenen, is benaderd welke besparing verwacht mag worden.
- Discussie met telers over de resultaten van de deskstudie.

1.2 Doelstellingen en toepassingstermijn

De doelstellingen van dit project kunnen opgesplitst worden naar energiedoelstellingen, technische doelstellingen en nevendoelestellingen. Na deze deskstudie zou één of enkele concepten in een experiment of in de praktijk getest moeten worden. De kennis daaruit kan vrijwel direct toegepast worden bij nieuwbouw. In bestaande teeltsystemen kan het ook vrijwel direct toegepast worden, maar hier zullen dan naar verwachting extra kosten voor de aanpassingen gemaakt moeten worden. Daarom zullen naar verwachting de resultaten in eerste instantie bij nieuwbouw worden toegepast.

1.2.1 Energiedoelstelling

De energiedoelstelling van het project is een energiebesparing van minimaal 5% door aanpassingen in de manier van verwarmen van het gewas.

1.2.2 Technische doelstellingen

De verschillende technische doelstellingen van dit project zijn:

- Het in kaart brengen van verschillen in respons (incl. de snelheid van de respons) van verschillende plantendelen op temperatuur en vocht
- Het in kaart brengen van alternatieve verwarmingsystemen (type verwarming, plaatsing van verwarming en energiebron) om het gewas gericht te verwarmen en om energie te besparen
- Optimaliseren van productie en minimaliseren van energie-input door gericht bepaalde plantendelen meer of minder te verwarmen

1.2.3 Nevendoelstellingen

De nevendoelestellingen van dit project zijn:

- Een verbetering van het rendement van de Nederlandse glastuinbouw
- Een betere gewassturing

2 Temperatuureffect op gewasgroei en – ontwikkeling

De gewastemperatuur beïnvloedt de (snelheid van) processen die de groei en ontwikkeling van een gewas bepalen (Zie 8.5: Relatiediagram temperatuursinvloed op de groei van een kasgewas). Voor een kasgewas geldt dat daarmee ook de uiteindelijke gewasproductie en kwaliteit wordt bepaald. Wisseling in dag- en nachttemperatuur heeft daarbij een sturend effect op de ontwikkeling (Myster en Moe, 1995).

Er kunnen meerdere niveaus onderscheiden worden waarop de temperatuureffecten op de gewasproductie kunnen worden beoordeeld. Voor de tuinbouwpraktijk gaat het om de hoeveelheid in stuks of kilo's en de kwaliteit van de gewasproductie.

Kennis over het temperatuureffect op onderliggende fysiologische processen, op transportverschijnselen in de plant en op de morfologische ontwikkeling is noodzakelijk om te begrijpen hoe de uiteindelijke gewasproductie tot stand komt. Vervolgens kan nagedacht worden hoe deze processen zijn te manipuleren en de effecten daarvan in te schatten of te testen om te benutten bij alternatieve vormen van verwarming.

In een plant kan een aantal organen of plantonderdelen worden onderscheiden (zie Figuur 2.1). Daarin verlopen verschillende processen en tussen de organen vindt transport plaats.

In dit literatuuroverzicht wordt eerst ingegaan op de temperatuureffecten op de afzonderlijke onderdelen van het gewas, waarna in de discussie en conclusies wordt ingegaan op wat deze kennis betekent voor het separaat verwarmen van de verschillende plantorganen.

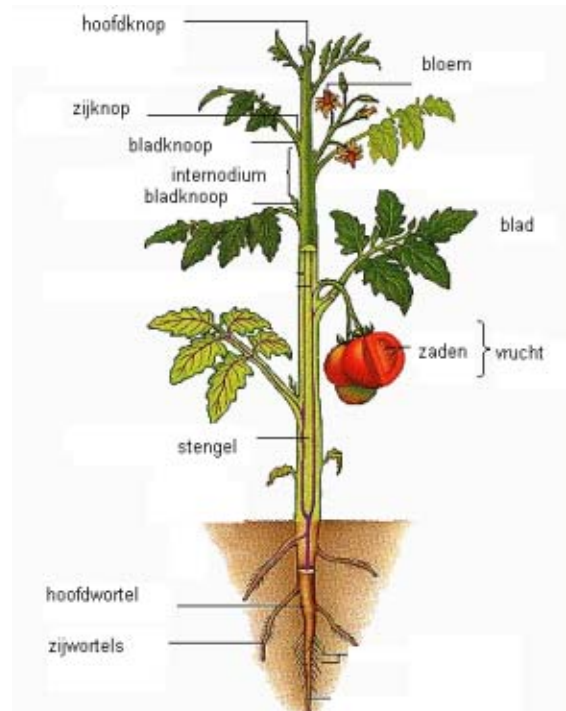
De plantorganen en hun functie die onderscheiden worden in relatie tot temperatuureffecten zijn:

Wortel

Wortels zijn belangrijk voor de verankering van de plant, voor de opname van water en nutriënten en voor de aanmaak van een groep plantenhormonen: cytokininen. Bij glastuinbouwgewassen die in een beperkt volume substraat los van de bodem worden geteeld kan de temperatuur van het wortelmilieu goed worden geregeld door het substraat te verwarmen. Bij teelt in de grond of in potten is door bodemkoeling en -verwarming regeling van de temperatuur van het wortelmilieu mogelijk, waardoor kieming en wortelontwikkeling goed aangestuurd kunnen worden.

Stengel

De stengel zorgt voor transport van voedingsstoffen, water en suikers naar alle delen van de plant en voor de ruimtelijke (hoogte) verdeling van de bladeren en het gewas. De lengte van een stengel kan sterk variëren en de stengelstrekking kan door temperatuur beïnvloed worden, en dan met name door het verschil tussen de dag- en



Figuur 2.1. Schematische weergave van een tomatenplant en de verschillende plantorganen waar temperatuursinvloeden een rol spelen.

nachttemperatuur, DIF. Een stengel is opgebouwd uit stengeldelen (internodia) en knopen (nodia) waarop bladeren, bladparen, stengels van de volgende orde of bloemen ontstaan. De bloemsteel heeft vaak een geheel eigen lengtegroei die sterk kan afwijken van de groei van de (rest van de) stengel, bijvoorbeeld bij *Gerbera*.

Blad

De bladeren zijn de plantonderdelen die voor de onderschepping van het licht zorgen en voor de benodigde gas-uitwisseling (CO₂ opname en verdamping van water) tussen de plant en de omgeving. De fotosynthese vindt voornamelijk in de bladeren plaats en transpiratie kan voor extra koeling zorgen als gewastemperaturen verschillen van omgevingstemperaturen.

Groeipunt

De hoofdknop is het belangrijkste groeipunt. Afhankelijk van het type gewas kan het groeipunt hoog in de lucht groeien gedurende het grootste gedeelte van de teelt, zoals bij tomaat en paprika; groeit het geleidelijk van laag naar hoog, zoals bij roos en *Chrysant* groeit het laag bij de grond, zoals bij *Gerbera* en *Anthurium*; sla en *Saintpaulia*, of groeit het aanvankelijk zelfs in de grond, zoals bij *Alstroemeria*, lelie en *Freesia*. Naast de knop die zorgt voor de ontwikkeling van de hoofdrichting van de plant kunnen vanuit de oksels van bladeren andere knoppen uitlopen. Het aantal uitlopende knoppen varieert per plantensoort en is bv. bij siergewassen vaak bepalend voor de sierwaarde. Bij kasgewassen waar het uitlopen van zijknoppen ongewenst is zorgen uitlopende knoppen voor een extra kostenpost voor de verwijdering.

Bloem

De meeste planten vormen bloemen. Bij de siergewassen gaat het vooral om de sierwaarde van de bloem. Voor vruchtgroenten zijn bloemen belangrijk omdat ze uitgroeien tot het gewenste product. De aanleg en uitgroei van bloemen is in meerdere gewassen door temperatuur of door daglengte te reguleren.

Vrucht en zaad

Voor de vruchtgroenten is de vorming van vruchten essentieel. Afhankelijk van het gewas is ook de vorming van zaden belangrijk. De vruchtzetting en de kwaliteit van het stuifmeel dat nodig is voor de bevruchting kan door temperatuur worden beïnvloed. De uitgroei van vruchten is wordt in hoge mate bepaald door de temperatuur.

Plantopbouw

De plantopbouw vertoont tussen gewassen grote verschillen. Een opgaand groentegewas als tomaat kent een heel andere structuur dan een bolgewas of knolgewas. Bij tomaat zijn de verschillende plantonderdelen goed te onderscheiden, maar bij tulp en *Freesia* vindt de aanleg van vrijwel de gehele plantstructuur plaats voordat de plant uitgroeit. Voor een literatuurstudie naar de effecten van temperatuur op de ontwikkeling van een gewas is deze verscheidenheid een complicerende factor. In dit verdere hoofdstuk wordt uitgegaan van een gewas met duidelijk onderscheiden delen, omdat alleen die delen mogelijk afzonderlijk in temperatuur kunnen worden gestuurd. Een gewas met plantopbouw die geen ruimte geeft voor afzonderlijke verwarming valt niet onder de beoogde toepassingen van dit project.

Gewasspecifieke informatie

Voor komkommer (Marcelis, 1993a), tomaat (Van der Ploeg en Heuvelink, 2005) en *Chrysant* (Van der Ploeg en Heuvelink, 2006) is uitvoerig de invloed van temperatuur op deze gewassen beschreven. In deze publicaties wordt onderscheid gemaakt tussen de ontwikkelingsprocessen en de biomassa-productie. Het voert te ver om in dit overzicht alle effecten die in deze studies worden beschreven te vermelden. Eén aspect dat voor beide gewassen wordt genoemd is dat lagere temperaturen resulteren in een langzamere, maar langere uitgroei van bladeren die in

de beginperiode van het gewas minder licht onderscheppen, maar over de hele teelt genomen leiden tot een hogere bladoppervlakte doordat bladeren minder snel afvallen.

2.1 Wortel

Al meer dan 100 jaar is er aandacht voor de worteltemperatuur in relatie tot groei en ontwikkeling en in de laatste decennia is daar uitvoerig over gepubliceerd (bijv. Cooper, 1973; Nielsen, 1974; Vogelesang, 1984, Vogelesang, 1993; Ahn *et al.*, 1999). In het literatuuroverzicht dat Vogelesang (1993) geeft worden de volgende aspecten genoemd:

- Verhoging van de worteltemperatuur bevordert de groei als de ruimtetemperatuur laag is, maar het is niet duidelijk of een verhoogde worteltemperatuur voldoende is om de verlaagde ruimtetemperatuur te compenseren
- Een hoge bodemtemperatuur bij verlaagde ruimtetemperatuur wordt gebruikt om de wortelgroei te stimuleren, omdat de uitgroei van de wortels sneller verloopt
- Een bodemtemperatuur van meer dan 32 °C is over het optimum voor groei heen
- De optimale bodemtemperatuur is afhankelijk van de bovengrondse condities: temperatuur, lichtintensiteit en daglengte.

Vogelesang (1993) gaat niet in op de effecten van bodemtemperatuur op ondergronds groeiende gewasdelen zoals bollen, knollen en rhizomen, maar beperkt zich tot gewassen met een bovengrondse ontwikkeling waarbij alleen de wortels in de bodem groeien.

Worteltemperatuur is volgens Vogelesang (1993) belangrijk voor de volgende processen

- Wateropname: deze kan door lage temperaturen worden belemmerd omdat de permeabiliteit van de membranen wordt verlaagd en de beschikbaarheid van energie voor de wateropname afneemt.
- Nutriëntenopname: een verminderde opname van nutriënten bij lage temperatuur is meer het gevolg van geremde groei van de wortels dan een direct gevolg van afname van de opnamekinetiek. De temperatuurrespons per element is wel verschillend en voor een optimale opname moet de voedingsgift worden afgestemd op de worteltemperatuur.
- Hormoonproductie van de plant: een lage temperatuur remt de aanmaak van cytokininen. Het optimum voor de aanmaak van cytokinine is bij maïs 28 °C met een scherpe afname bij een temperatuur boven de 33 °C. Voor de activiteit van abscisinezuur in de wortel is een lage temperatuur juist stimulerend. Tussen de hormonen treden interacties op in de activiteit bij verschillende temperaturen.

Worteltemperatuur heeft effect op fotosynthese en de onderhoud- en groeiademhaling van de plant, maar de effecten verschillen per gewas. De effecten zijn hierbij niet direct, maar indirect en vertonen interacties met verdamping, beschikbaarheid en vraag naar assimilaten ('source'-sink') en de hormonenbalans. In haar eerdere literatuurstudie (Vogelesang, 1984) wordt nadrukkelijk aandacht besteed aan de relatie tussen worteltemperatuur en groei van de plant die beschreven kan worden als een optimumcurve. In haar proefschrift wordt dit niet meer genoemd (Vogelesang, 1993). Het onderzoek van Vogelesang laat zien dat de invloed van worteltemperatuur bij potplanten voor elk type potplant anders kan zijn. Wel geeft zij als advies dat voor groene planten een worteltemperatuur tot 30 °C geen probleem is en dat voor bloeiende potplanten de worteltemperatuur niet boven de 26 °C uit moet komen.

De activiteit van het wortelstelsel voor de opname van water en nutriënten en de productie van planthormonen is een proces, dat beïnvloed wordt door worteltemperaturen (Dieleman *et al.*, 1998). In de worteltopjes worden cytokininen geproduceerd die via de opwaartse xyleemstroom naar boven wordt getransporteerd, waar het de groei en productie stimuleert (Dieleman *et al.*, 1998).

Tomaat

Voor tomaat hebben Kaarsemaker en Van Telgen (2006) een literatuurstudie gedaan naar het effect van verhogen van de worteltemperatuur en de kennis daarvan toegepast op de resultaten van een experiment met matverwarming.

Op basis van de literatuur concluderen zij dat matverwarming voordelen kan bieden als de optimale ruimtetemperatuur niet kan worden gerealiseerd of als door koeling de worteltemperatuur te laag blijft. Additionele matverwarming voor het verwarmen van de wortelzone kan voordelen bieden als de optimale ruimtetemperatuur niet gerealiseerd kan worden (Venema, 2001).

Matverwarming gaf in het experiment grotere bladeren, maar een onderstam gebruiken had een sterker effect dan verhogen van de bodemtemperatuur (Kaarsemaker en van Telgen, 2006). Zij veronderstellen ook dat aan het eind van een dag de mattemperatuur langer boven de ruimtetemperatuur gehouden moet worden. Zij vonden geen aanwijzingen dat matverwarming de nutriëntenopname beïnvloedde.

Bij jonge tomatenplanten die opgroeiden bij een luchttemperatuur van 25 °C, maar bij verschillende worteltemperaturen in de range van 17-30 °C, bleek dat de hogere worteltemperaturen leidden tot de hoogste spruit/wortelverhouding (Abd el Rahman *et al.*, 1959). Het verwarmen (25 °C) van het wortelmedium gedurende de gehele productiecycclus van tomaat (dagtemperatuur 20 °C, nachttemperatuur 13 °C en 18 °C) gaf een toename van de grootte van de spruit en het wortelstelsel (Maher, 1978), en had vooral effect bij lagere nachttemperaturen (5 °C t.o.v. 13 °C) (Maher, 1980). De productie bij lagere nachttemperaturen (13 °C) werd positief beïnvloed door de wortels naar 25 °C te verwarmen, en steeg van 15,9 naar 18,9 kg m⁻² (Maher, 1978). Tomaten groeiden beter (en produceerden 13-16% meer vruchten) met alleen wortelverwarming (25 °C) en bij lage nachttemperaturen van 10-12 °C en zonder verwarming (8-9 °C) ten opzichte van 15-18 °C, waardoor een energiebesparing van 68% gehaald werd (Moss, 1983). Eerdere en hogere opbrengsten bij wortelverwarming van tomatenplanten die bij hogere lichtomstandigheden opgroeiden (Fröhlich, 1959) konden in andere experimenten (Calvert, 1956; Ploegman, 1964; Boxall, 1971; Abdelhafeez *et al.*, 1971) niet worden aangetoond.

In zijn proefschrift vond Harssema (1977) dat bladontwikkeling negatief gecorreleerd was met worteltemperaturen <20 °C (gedurende het hele jaar), en worteltemperaturen >30 °C (alleen in de zomer), door een daling van het Specifiek Bladoppervlak (m² g⁻¹) met 15-20% (Harssema, 1977). Gewastranspiratie bij jonge (kleine) tomatenplanten was positief gecorreleerd met worteltemperatuur tussen 12 en 35 °C, doordat bij lage worteltemperaturen de dampdruk dicht bij de grond lager is dan hoger in de lucht, waardoor sneller transpiratie optreedt. De gereduceerde groei bij lage worteltemperaturen lag niet aan een verlaagde opname van fosfaat (Harssema, 1977). Bij een vroege zaaidatum hadden lage worteltemperaturen (12 °C) bij de begingroei van jonge tomatenplanten (dagtemperatuur 20-25 °C; nachttemperatuur 15-18 °C) geen significant effect op uiteindelijke opbrengst, maar bij laat zaaien werd de uiteindelijke opbrengst met 10% gereduceerd doordat er minder vruchten per plant waren gevormd, ondanks dat de vruchten iets zwaarder waren (Harssema, 1977). Bij een dag- / nachttemperaturen van 20-25 / 15-18 °C, gaven tomatenplanten die in potten opgroeiden bij een worteltemperatuur van 25 °C hogere opbrengsten (13-16%) dan planten met wortels in een lagere omgevingstemperatuur (12 °C). Het effect was groter bij lagere nachttemperaturen (10-12 °C) en zonder verwarming (8-9 °C) in vergelijking met 15-18 °C (Harssema, 1977).

Paprika

Voor paprika is onderzoek gedaan naar het effect van matkoeling in zomerperiode op groei en kwaliteit (Van Gurp, 1996). Hij vond geen significant verschil in productie tussen wel en niet koelen van het substraat. De gerealiseerde mattemperatures in de zomer waren 17,5 en 22 °C. De ruimtetemperaturen werden niet door de koeling beïnvloed, zodat geen uitspraak gedaan kan worden over het effect van een hogere mattemperatuur bij een verlaagde ruimtetemperatuur. Het verwarmen van de voedingsoplossing naar 18 °C bij een (onverwarmde) plastickeuze van paprika in Egypte gaf een toename in watergebruik, planthoogte, bladoppervlakte, droge stofproductie, aantal vruchten en vruchtgewicht tot en met de koelere voorjaarsperiode, maar had geen significant effect in de warmere zomerperiode (Abdel-Mawgoud *et al.*, 2005).

Komkommer

Bij komkommer ligt de optimale worteltemperatuur lager dan de optimale scheuttemperatuur, en beïnvloedt vooral de gewasvariabelen bladoppervlakte ratio (LAR) en bladstrekking (Kleinendorst en Veen, 1983). Bij de begingroei van komkommers resulteerde een verhoging van de bodemtemperatuur (tot 23 °C) in langere stengels; lagere bodemtemperaturen resulteerden in langdurige vertraging van de stengelgroei (Krug en Thiel, 1985). Komkommerkwaliteit werd niet negatief beïnvloed door lagere bodemtemperaturen (15-25 °C) (Krug en Thiel, 1985). Het enten van onderstammen (van Vijgbladpompoe, *Cucurbita ficifolia*) met een wortelstelsel dat is aangepast aan lagere wortelzonetemperaturen (optimum van 15 °C) onder Aziatische omstandigheden gaf goede mogelijkheden voor het telen van komkommer bij lagere worteltemperaturen (Ahn *et al.*, 1999). Bij het verder verlagen van de worteltemperatuur (van 20 °C naar 12 °C) werd de opname van water beperkt, waardoor de bladverdamping minder werd en de bladtemperatuur steeg, maar de fotosyntheseactiviteit met meer dan 40% afnam (Ahn *et al.*, 1999).

Roos

De combinatie van lage nachttemperaturen en wortelverwarming gaf energiebesparing bij roos, maar het combineren van wortelverwarming met hogere nachttemperaturen gaf een hogere opbrengst met een constantere productie, zodat het energiegebruik per bloem werd verminderd door wortelverwarming. In een experiment op een watercultuur liepen grondscheuten eerder uit en nam de drogestof toename sneller toe als gevolg van een worteltemperatuur van 26 °C in vergelijking met 20 en 11 °C bij een ruimtetemperatuur van 20 °C (Dieleman *et al.*, 1998). In de hormoonhuishouding werd hiervoor geen verklaring gevonden.

Overige gewassen

Het verwarmen van de wortels van *Kentia fosterana* van 18 naar 25 °C (bij hoge nachttemperaturen) gaf een toename van de totale groei met 31% en een toename van het bladoppervlak met 33%. De totale groei en de toename van het bladoppervlak namen bij lagere nachttemperaturen (maar met wortelverwarming) slechts in geringe mate af ten opzichte van de groei bij 18 °C (Moss, 1983). Bij het 's nachts verwarmen van de voedingsoplossing van sla (*Lactuca sativa capitata* L.) tot 10 °C bij een verlaagde luchttemperatuur van 6 °C ten behoeve van de energiebesparing, werd de groei gestimuleerd (ca 15% hoger kropgewicht), maar nam het nitraatgehalte in de sla iets toe (Van der Boon en Steenhuizen, 1986; Van der Boon *et al.*, 1990; Steingröver *et al.*, 1993).

Onderzoek met tabletverwarming bij *Saintpaulia* en *Begonia* liet zien dat er verschillen bestaan tussen gewassen, die van invloed zijn op de wijze waarop tabletverwarming wordt gebruikt. De groeisnelheid van *Ficus benjamina* en *Schefflera arboricola* cv. 'Compacta' namen toe op verwarmde aluminium bedden. Wortelzonetemperaturen tot 30 °C kunnen worden aangehouden voor bladgewassen (Vogelezang, 1990). *Spathiphyllum* en *Guzmania* cv. 'Empire' kunnen ook d.m.v. tabletverwarming geteeld worden, maar optimale wortelzonetemperaturen liggen lager dan voor bladplanten (Vogelezang, 1990). Het verwarmen van de wortelzone bij *Chrysant* bij lage nachttemperaturen gaf geen grotere afvoer van zetmeel uit de bladeren. De hypothese werd verworpen dat een toename van de wortelgroei en wortelactiviteit door plaatselijke verwarming een grotere 'sink'-functie zou creëren, met een toename van het carbohydraattransport van bladeren naar wortels (Heinsvig Kjaer, 2007).

Conclusie over worteltemperatuur

Met de juiste temperatuur van het wortelmedium kan de kieming goed gestuurd worden. Er zijn aanwijzingen dat een verhoging van de worteltemperatuur bij hoog opgaande gewassen de effecten van een verlaagde ruimtetemperatuur gedeeltelijk zouden kunnen vervangen, of andersom geformuleerd, dat een verhoging van de worteltemperatuur zou kunnen betekenen dat de ruimtetemperatuur zou kunnen worden verlaagd. Er is op basis van de literatuur te concluderen dat de worteltemperatuur afgestemd moet zijn op de ruimtetemperatuur en dat in dit gebied ruimte is voor optimalisatie. Bij potplanten waarbij het groeipunt dicht bij de bodem zit zijn de effecten van worteltemperatuur en ontwikkeling van de plant niet als afzonderlijke processen te beoordelen.

Een verlaging van de worteltemperatuur is ongunstig voor de wateropname en de aanmaak van cytokinine en daarmee voor de ontwikkeling van de bovengrondse plantendelen. Voor verschillende gewassen lijkt een

temperatuur hoger dan ca. 20 °C geen beperkingen op de gewasontwikkeling en productie hebben. Het gebruik van onderstammen aangepast aan koude zou deze minimumtemperatuur nog verder kunnen verlagen. De literatuur laat zien dat extreme temperaturen (>30 °C) een overwegend negatief effect op blad- en plantontwikkeling hebben.

De bol- en knolgewassen worden buiten beschouwing gelaten, omdat daarbij de ontwikkeling van de plant grotendeels in de bodem plaatsvindt en de bodemtemperatuur zeer bepalend is voor de ontwikkeling.

2.2 Stengel

De stengel zorgt voor transport van voedingsstoffen, water en suikers naar alle delen van de plant en voor de ruimtelijke (hoogte-) verdeling van de bladeren en het gewas. De lengte van een stengel kan sterk variëren en de stengelstrekking kan door temperatuur beïnvloed worden, en dan met name door het verschil tussen de dag- en nachttemperatuur, DIF. Een stengel is opgebouwd uit stengeldelen (internodia) en knopen (nodia) waarop bladeren, bladparen, stengels van de volgende orde of bloemen ontstaan. De bloemsteel heeft vaak een geheel eigen lengte-groei die sterk kan afwijken van de groei van de (rest van de) stengel, bijvoorbeeld bij *Gerbera*. Onderzoek naar temperatuureffecten op de stengel zijn geconcentreerd geweest op de effecten op de stengelstrekking (Myster en Moe, 1995; Langton en Cockshull, 1997b).

Een aspect dat bij kasgewassen weinig is onderzocht, is de invloed van de stengeltemperatuur op transportprocessen. In de literatuur dient het (extreem) koelen van stengels vaak een ander doel, namelijk het tot stilstand brengen van alle transportprocessen. Vier voorbeelden van transport door de plant van hormonen of andere signaalstoffen worden gegeven (Malladi en Burns, 2007), maar gaan niet in op de rol van temperatuur hierbij. In onderzoek waarbij door middel van een koude manchet de stengeltemperatuur van enkele gewassen werd gekoeld (1 °C), werd duidelijk dat transportprocessen slechts in geringe mate gehinderd werden als er geen P-proteïnen in de zeefvaten aanwezig waren (zoals bijv. bij maïs en tarwe), terwijl het transport bijna tot stilstand werd gebracht als de planten wel P-proteïnen bevatten in de zeefvaten, zoals bij tuinboon en smalle weegbree (Faucher *et al.*, 1982). Het langzaam afkoelen (naar 1 °C in 90 minuten) of het versneld afkoelen (naar 1 °C binnen 5 seconden) gaf navenant een langzame en een snelle teruggang in de transportsnelheid. Vruchtgewassen zoals pompoen (*Cucurbita pepa*, familie van de komkommer), bevatten zulke P-proteïnen (Webb en Gorham, 1965).

Een week koelen (1,5 °C) van 5 cm stengel van een aantal variëteiten van bruine boon (*Phaseolus vulgaris*), liet zien dat er grote variatie bestaat in de afname van de hoeveelheid assimilaten die in de wortels werden geïnvesteerd (Hannah *et al.*, 2001). Het transport naar andere delen van de plant werd niet significant beïnvloed.

Voor aantasting van de stengel door *Botrytis* is de aanwezigheid van wonden, bijvoorbeeld snij – of breukvlakken van weggenomen bladeren of beschadigingen bij gewaswerkzaamheden essentieel. Deze vlakken vormen de invalspoorten voor *Botrytis*. Om aantasting te voorkomen is de wondheling belangrijk. Een hogere stengeltemperatuur bevordert de wondheling (Köhl *et al.*, 2007).

Tomaat

De lengtegroei van tomaat wordt door een hogere nacht- dan dagtemperatuur geremd, door een kortere internodium lengte (Van der Ploeg en Heuvelink, 2005). Hogere dagtemperaturen waren positief gecorreleerd met stengellengte, met indicaties van erg hoge dagtemperaturen voor optimale stengelgroei (Langton en Cockshull, 1997a). Een algehele verlaging van de temperatuur geeft een kortere stengel door reductie van het aantal gevormde internodiën.

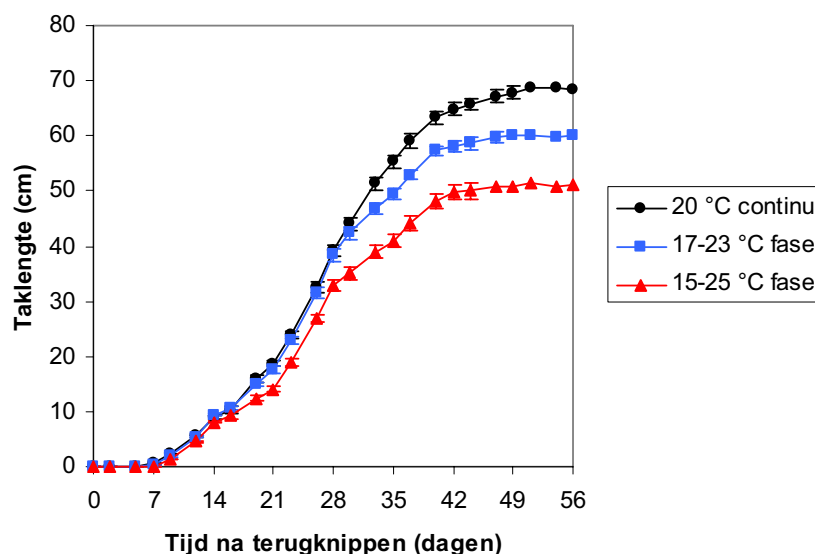
Komkommer

Stengelgroei werd gereduceerd bij lagere temperaturen, maar geen na-effecten konden worden aangetoond als de temperatuur weer verhoogd werd tot 18 °C (Liebig, 1985). DIF heeft een sterk effect op de stengelstrekking bij komkommer (Xiong *et al.*, 2002). Een dag/nacht temperatuur van 25/19 °C geeft een veel sterker stengel groei dan

een dag/nachttemperatuur van 19/25 °C. De stengelgroei werd ook nog versterkt door een belichting met ver-rood licht aan het eind van de dag ten opzichte van een belichting met roodlicht aan het einde van de dag.

Roos

Voor de toepassing van temperatuurintegratie bij de rozenteelt is de stengellengte cruciaal omdat het de prijs bepaalt. De lengte van de stengels bij oogst neemt af bij toenemende bandbreedte bij temperatuursintegratie. De afname is groter naarmate de integratieperiode wordt verlengd. De ontwikkelingssnelheid kan beïnvloed worden door de toepassing van temperatuursintegratie. Bovengronds versgewicht nam af bij een bandbreedte van 10 °C door een iets kortere teeltduur, maar niet bij een bandbreedte van 6 °C (Dieleman *et al.*, 2005; Dieleman en Meinen, 2007; Figuur 2.2).



Figuur 2.2. Het effect van tweedaagse temperatuursintegratie op de taklengte bij roos (Dieleman en Meinen, 2007). 'Fase' houdt in dat tegelijkertijd het lichtniveau werd verhoogd.

Chrysant

Net zoals bij veel andere planten is ook bij *Chrysant* een sterk positieve relatie aangetoond tussen internodiumlengte en het verschil tussen dag- en nachttemperatuur (DIF). Ook wordt beweerd dat zo'n relatie niet zou bestaan en dat het juist de absolute afname van de dag- en de nachttemperatuur zijn (de zgn. 'DROP') die de internodiumlengte zou verklaren (Langton en Cockshull, 1997a). Ander onderzoek gaf aan dat de internodiumlengte wordt bepaald door onafhankelijke en tegenwerkende effecten van dag- en nachttemperaturen (Carvalho *et al.*, 2002).

Overige gewassen

De analyse van datasets voor petunia (dagtemperatuur 10-30 °C; Kaczperski *et al.*, 1991), fuchsia (12-24 °C; Erwin *et al.*, 1991) en lelie (14-30 °C; Erwin *et al.*, 1994) lieten zien dat stengelgroei een goede relatie heeft met de absolute waarde van dag- en nachttemperatuur. Hogere dagtemperaturen waren positief gecorreleerd met stengelgroei (erg hoge temperaturen voor maximale stengelstrekking). De invloed van nachttemperaturen was meer gevarieerd. In lelie en fuchsia, had een toename van de nachttemperatuur een toename van de internodiumlengte tot gevolg, wat bij tomaat tegenovergesteld is. Bij petunia en chrysant had nachttemperatuur weinig invloed op de internodiumlengte. Bij *Ficus* (*Ficus benjamina* 'exotica') werd de lengte van het internodium niet beïnvloed door temperatuur (17-35 °C) bij een teelt in de maanden juli-september en augustus-oktober (Dijkshoorn-Dekker, 2002).

DIF-modellen lijken alleen te voldoen als dag- en nachttemperatuur een tegenovergesteld effect op de stengelstrekking hebben, zoals bij lelie en fuchsia. In het kort komt het er op neer dat stengelstrekking wordt bepaald door de absolute waarden van dagtemperatuur en nachttemperatuur (Langton en Cockshull, 1997b).

Een verlaging van de temperatuur gedurende kortere periodes overdag (8 uur van 21 naar 15 °C bij bv *Fuchsia x hybrida* en *Impatiens New-Guinea*), verminderde de planthoogte (stengelstrekking). Lagere temperaturen overdag is effectiever dan een 4-uurs temperatuursverlaging van 20 naar 14 °C in dezelfde periode. Voor *Begonia x hiemalis* en *Euphorbia pulcherrima* was het tijdelijk verlagen van de temperatuur ook 's nachts effectief en minstens zo effectief als een normale DIF-behandeling (Vogelezang, 1997). Bij *Dianthus caryophyllus* nam het aantal zijtakken af bij hogere basistemperaturen. Bij 16 °C basistemperatuur, gaven hoge temperatuurpulsussen een afname van het aantal zijtakken, maar bij 24 °C hadden hogere temperatuurpulsussen geen effect (Kresten Jensen, 1997).

Door inversie van dag- en nachttemperaturen ((13/21, 16/18°C) 18/16°C) wordt planthoogte verlaagd en kan daardoor gebruikt worden om de juiste planthoogte te verkrijgen. De planthoogte van *Impatiens* cv. 'Impuls' werd genoeg verlaagd bij een 13/21 °C dag/nacht temperatuur regime. Chemische remming was nog steeds noodzakelijk voor *Pelargonium* cv 'Pulsar Red' en *Fuchsia* cv. 'Dollar Princess' (Vogelezang *et al.*, 1992). Tabletverwarming met een wortelzonetemperatuur van 30 °C reduceerde het aantal zijtakken van *Spathiphyllum* (Vogelezang, 1990).

Bij een negatieve DIF-behandeling nam de planthoogte met 25% af bij *Pelargonium*, en tot 35% bij andere potplanten, in vergelijking met een DIF+2 behandeling (Vogelezang, 2000). De lengte van de bladsteeltjes en het bladoppervlak werden in mindere mate gereduceerd (10-15%) dan de lengte van de hoofdstengel bij een negatieve DIF-behandeling. Er werd geen interactie gevonden tussen DIF-strategie en licht- of temperatuurniveau op de stengelstrekking. Plantkwaliteit werd wel sterk beïnvloed. Een hoog lichtniveau gaf een toename van het plantgewicht per cm (dichtheid), bladdikte en chlorofylgehalte. Vergeleken met traditionele groeiomstandigheden nam de plantkwaliteit substantieel toe, door een negatieve DIF-behandeling te combineren met een hogere gemiddelde dagtemperatuur dan gewoonlijk. In dit geval werden de positieve effecten van een negatieve DIF-behandeling (compactheid, plantdichtheid, bladdikte) gecompleteerd door een positief effect op groeiperiode en plantgewicht als resultaat van een hogere gemiddelde etmaaltemperatuur (Vogelezang, 2000). Dit brengt wel hogere energiekosten met zich mee.

Een DIF-6 °C behandeling had een reducerend effect op de planthoogte zowel in *Chrysant* als in *Begonia*, maar groeiregulatoren waren nog steeds noodzakelijk om een acceptabele planthoogte te realiseren. *Kalanchoe* gaf een tegengestelde reactie op de DIF-6 °C behandeling, die resulteerde in een langere stengel. Bij *Chrysant*, had de DIF-behandeling meer effect dan een tijdelijke temperatuursverlaging om de planthoogte te beperken, terwijl in *Poinsettia*, beide behandelingen de planthoogte in dezelfde mate reduceerden (Cuijpers en Vogelezang, 1992).

In een onderzoek naar de vatbaarheid voor koeling van verschillende plantenonderdelen van *Saintpaulia ionantha* en *Coffea arabica* (Bodner en Larcher, 1987), werd duidelijk dat er grote verschillen bestaan. De meest gevoelige delen van *Saintpaulia* in de bloeifase waren de bloemstelen die al na 12 uur bij 6 °C schade vertoonden. In afnemende vatbaarheid was de schade in de bladeren het grootst bij het palissaden-parenchym > spons-parenchym > top-epidermis > onder-epidermis. De huidmondjes waren het minst vatbaar voor koude. Voor koffie (*C. arabica*) was het meest kwetsbare deel voor koude de basis van de stam, die na 36 uur bij 1 °C behoorlijke schade vertoonde. Ook was het topgroeipunt erg gevoelig voor kou.

Conclusie over stengeltemperatuur

De stengellengte wordt beïnvloed door het temperatuurregime dat wil zeggen de hoogte van de etmaaltemperatuur en de wisseling tussen dag- en nachttemperatuur dat is gebruikt. Het lijkt aannemelijk dat het hierbij gaat om de afsplitsingsnelheid van het groeipunt, en niet om groei van de internodia door celdelingen onder het groeipunt. In alle onderzoeken is de ruimtetemperatuur gestuurd en niet afzonderlijk de stengeltemperatuur. Het transport door de stengel wordt nauwelijks beïnvloed door lagere stengeltemperaturen, tenzij de temperatuur extreem laag wordt opgelegd. In de stengel zal over grotere afstanden geen warmtetransport plaatsvinden omdat daarvoor de energietransporten via de waterstroom te klein zijn. De verplaatsing van warmte door de waterstroom wordt gebruikt in

sapstroommeters, maar de daarbij verplaatste energie is gering. Een hogere stengeltemperatuur bevordert de heling van wonden op stengels en is daarmee gunstig om de aantasting door *Botrytis* te voorkomen.

2.3 Blad

De bladeren zijn de plantonderdelen die voor de onderschepping van het licht zorgen en voor de benodigde gas-uitwisseling (CO_2 opname en verdamping van water) tussen de plant en de omgeving. De fotosynthese vindt voornamelijk in de bladeren plaats en transpiratie van de bladeren kan voor extra koeling zorgen als gewastemperaturen verschillen van omgevingstemperaturen.

Over de invloed van temperatuur op CO_2 opname, fotosynthese en verdamping is heel veel geschreven. Deze beperkte literatuurstudie is er niet opgericht om al die informatie opnieuw weer te geven. Er is in verschillende artikelen beschreven dat de netto fotosynthese een optimum heeft bij een temperatuur in het traject van 18-28 °C. Bij een hogere temperatuur kosten de processen voor het onderhoud van de plant zoveel energie dat er netto minder overblijft voor groei. Alle biochemische processen gaan bij hogere temperaturen sneller verlopen, totdat beschadigingen optreden die de processen juist remmen. Temperaturen boven de 40 °C zijn daarbij sterk nadelig. Door verandering van de verhoudingen in de snelheid van de processen kan het netto effect wijzigen.

Variatie in bladtemperatuur in *Gerbera* en *Anthurium* als gevolg van zoninstraling is met thermografie gemeten (Baas en Warmenhoven, 2003). Zoninstraling is volgens hen de belangrijkste bron van variatie in bladtemperatuur. In de nacht, bij afwezigheid van directe straling, is de variatie gering. De aanmaak van bladeren is bij alle gewassen positief gecorreleerd met temperatuur. Een lage temperatuur kan leiden tot de vorming van anthocyanen en daarmee de kleur van bladeren beïnvloeden. Deze invloed kan zowel gewenst als ongewenst zijn.

In metingen bij suikerbiet (Grusak en Lucas, 1984; 1985; 1986; Grusak, 1986; Grusak en Minchin, 1989) om de transportremming door koeling van de bladeren (van 25 naar 1 °C in stappen van 4 °C elke 16 minuten) te analyseren, werd duidelijk dat een langzame afkoeling de eerste keer weinig effect had op de transportsnelheid, maar dat elke volgende koeling het transport met ca 9% remde (Grusak en Lucas, 1985). Een initiële snelle afkoeling naar 1 °C vóór de langzame afkoeling, resulteerde meteen in bovengenoemde transportremming. Het snel opwarmen van het blad zorgde voor een herstel van het transport, terwijl langzame opwarming de remming niet kon opheffen. De manier van afkoelen (snel, langzaam) had invloed op de toewijzing van assimilaten naar verschillende sinks (Grusak en Lucas, 1986; Grusak en Minchin, 1989).

De verdamping van de bladeren kan worden gezien als een resultante van de energie-input – straling of als een resultante van het verschil in dampspanning tussen blad en omgeving. In beide situaties moet voor een stabiele gewasconditie er een evenwicht ontstaan tussen opgenomen energie van een blad en de energie die voor de verdamping nodig is. Een lagere temperatuur resulteerde zowel bij tomaat als bij Chrysant tot kleinere en dikkere bladeren die minder licht opvangen in de beginperiode van de groei (Van der Ploeg en Heuvelink, 2005; 2006), terwijl over de gehele groeiperiode er gemiddeld een hogere LAI werd gerealiseerd, door een langere uitgroei duur en bladeren die minder snel afvielen (Heuvelink, 1999). Dit fenomeen werd ook waargenomen bij komkommer (Marcelis, 1993a). Bij *Ficus* (*Ficus benjamina* 'exotica') werd het aantal bladeren en daarmee het bladoppervlak significant beïnvloed door temperatuur in een range van 17-35 °C bij een teelt in de maanden juli-september en augustus-oktober (optimum temperatuur 28 °C) (Dijkshoorn-Dekker, 2002).

Tomaat

Bladvorming en -afsplitsing wordt vooral beïnvloed door ruimtetemperatuur; de bladgrootte en daarmee het oppervlak behalve door licht, ruimtetemperatuur en CO_2 ook door de worteltemperatuur. De afsplitsingsnelheid van nieuwe bladeren bleek in een ruim temperatuurtraject van 17-27 °C vrijwel lineair samen te hangen met temperatuur (De Koning, 1994). Tomatenplanten die opgroeiden bij een gemiddelde temperatuur van 21 °C, maar bij een omgekeerd temperatuurregime ($T_{\text{dag}} < T_{\text{nacht}}$) bij verschillende dagtemperaturen (tussen 16 en 26 °C) en nachttemperaturen (tussen 12 en 26 °C), vertoonden geen verschillen in netto assimilatiesnelheid, maar wel in een verlaagd specifiek

bladgewicht (dikkere bladeren) (Heuvelink, 1989). In de eerste groeifase, als niet al het licht wordt onderschept (kleiner bladoppervlak), leidt dit tot groeiverlies. Koudeperiodes van 14 dagen met een temperatuur van 10 °C resulteerde in een verhoging van de drogestof in bladeren, door een sterke accumulatie van oplosbare suikers en zetmeel, zowel voor wilde als voor gedomesticeerde species (Venema, 2001). Het herstel van de bruto fotosynthesesnelheid bij herstel van de temperatuur was groter voor wilde species dan voor gedomesticeerde species (Venema, 2001).

Komkommer

Er ontstaan duidelijke verschillen in bladtemperaturen tussen een door zonlicht beschenen blad en een blad in de schaduw, zoals bij komkommer (Zhang *et al.*, 2002). De fysiologische betekenis hiervan werd niet onderzocht, maar richtte zich op de invloed van het microklimaat op de ontwikkeling van plagen en hun bestrijders. Het model PSCLIMATE (Plant Surface Climate) biedt wel aanknopingspunten voor berekeningen aan planttemperaturen op verschillende hoogtes (Zhang *et al.*, 2002).

Bij de begingroei van komkommer resulteerde een verhoging van de bodemtemperatuur in grotere bladeren, vooral bij hoge straling en hoge luchtvochtigheid; lagere bodemtemperaturen (16 °C in de eerste groeifase, iets onder de 16 °C in de groeifase erna in de lente en herfst en bij 12 °C in de zomerperiodes) resulteerden in het uitdrogen van de bladeren en in een langdurige vertraging van de bladgroei (Krug en Thiel, 1985). Ook andere auteurs hebben aangetoond dat lagere bodemtemperaturen (bv onverwarmde bodems) een grotere groeireductie geven dan lagere luchttemperaturen in de range van 10-20 °C (Liebig, 1985). Komkommerplanten kunnen 10 °C luchttemperatuur overleven, maar ernstige verdorring en chlorose treedt op als langere periodes (2x 6 dagen van 16 °C) aangehouden worden (Liebig, 1985; Janse, 2003). Matverwarming van 18 °C bij ruimtetemperaturen van 10-12 °C geeft bladchlorose (Janse en Raaphorst, 2003). Lagere temperaturen (10-12 °C) kunnen zorgen voor ophoping van assimilaten in het blad doordat ze trager afgevoerd worden (Janse, 2003). In een range van 10 °C ('s nachts) tot 28 °C (overdag) vertoonden de planten geen specifieke reactie op de amplitude van de dag/nacht temperaturen. Zo zou de temperatuur gecontroleerd kunnen worden om energiegebruik te minimaliseren (Krug en Liebig, 1981).

Het afwisselend aanbieden van hoge (25 °C) en lage (15 °C) temperaturen in de nacht, resulteerde in een relatief snelle groei van jonge komkommerplanten als de periodes 2 of 4 uur bedroegen, maar als de afwisselende periodes bestonden uit een nacht van 25 °C en een volgende nacht van 15 °C werd de groei gereduceerd. Het effect op de groei was veel minder na een dag met relatief weinig licht. In beide gevallen kon het verschil worden toegewezen aan verschillen in de bladoppervlakte ratio LAR (bladoppervlak / plant drooggewicht) (Challa en Brouwer, 1985).

Bij komkommer kan door middel van de temperatuursafhankelijke bladafsplitssnelheid de periode tussen planten en bloei worden geoptimaliseerd, die uiteindelijk het begin van de productieve periode aangeeft (Challa *et al.*, 1981).

In onderzoek naar de temperatuur van de source en de sink bij jonge komkommerplanten, werd aangetoond dat de temperatuur van de source (bladeren van 25 of 30 °C) geen invloed had op de assimilatenverdeling, terwijl de temperatuur van de sink (vruchten van 20 of 30 °C) 20% meer assimilaten in de warmere vruchten terecht kwam (Verkleij en Challa, 1988).

Conclusies over bladeren

Voor de bladeren is de temperatuur van belang bij de afsplitsing, de uitgroei, de biochemische functies van het blad als de verdamping. Nu zijn afsplitsing en uitgroei vooral van belang in jonge bladeren, terwijl in oudere bladeren juist de biochemische processen beïnvloedt worden door de temperatuur. Als nagedacht wordt over verwarming van gewasdelen kan bij opgaande gewassen vooral aan verschillen in temperatuur van bladeren op verschillende posities in het gewas worden gedacht. In een kasgewas zal door de verschillen in blootstelling aan zonlicht er een verschil in bladtemperatuur optreden. Sturing per gewaslaag zou mogelijk tot een netto hogere opbrengst kunnen leiden. Voor zover bekend is tot nu toe niet onderzocht wat de optimale temperatuur per bladlaag is. In de praktijk is daarom ook waar te nemen dat naast de verwarming onder het gewas, tussen het gewas niet of op verschillende hoogtes verwarming wordt toegepast.

2.4 Groeipunt

De hoofdknop is het belangrijkste groeipunt. Afhankelijk van het type gewas kan het groeipunt hoog in de lucht groeien gedurende het grootste gedeelte van de teelt, zoals bij tomaat en paprika; groeit het geleidelijk van laag naar hoog, zoals bij roos, *Chrysant* en *Anthurium*; groeit het laag bij de grond, zoals bij *Gerbera*, sla en *Saintpaulia*; of groeit het aanvankelijk zelfs in de grond, zoals bij *Alstroemeria*, lelie en *Freesia*. Naast de knop die zorgt voor de ontwikkeling van de hoofdrichting van de plant kunnen uit de knopen in de oksel van bladeren andere knoppen uitlopen. Het aantal uitlopende knoppen varieert per plantensoort en is bv. bij siergewassen vaak bepalend voor de sierwaarde. Bij kasgewassen waar het uitlopen van zijknoppen ongewenst is zorgen uitlopende knoppen voor een extra kostenpost voor de verwijdering.

Zoals bij de bladeren al is aangegeven is de ontwikkeling van het groeipunt in als er sprake is van vegetatieve ontwikkeling en dus bladafsplitsing positief gecorreleerd met de temperatuur. Een hogere temperatuur resulteert in meer bladafsplitsing. Deze relatie gaat op voor scheuten die al in ontwikkeling zijn. Bij rozen is het uitlopen van een nieuw oog tot een groeiende scheut afhankelijk van de temperatuur (Van den Berg, 1987). De afsplitsing en uitgroei van de zijknoppen is behalve van de temperatuur ook afhankelijk van het aanbod aan assimilaten (Buwalda, 2003). Een groter aanbod aan assimilaten laat meer knoppen uitlopen. Als eenmaal meer knoppen zijn uitgelopen moeten de beschikbare assimilaten wel over dit grotere aantal worden verdeeld, waardoor de ontwikkeling per knop weer minder kan worden.

Als een groeipunt gericht zou kunnen worden verwarmd, terwijl de overige plantdelen een normale temperatuur hebben zal de ontwikkeling sneller verlopen. Het gevolg is wel dat het groeipunt een sterkere vraag naar assimilaten en nutriënten zal kennen en dit kan ten koste gaan van andere ontwikkelende planten delen zoals jonge vruchten.

2.5 Bloem

De meeste planten vormen bloemen. Bij de siergewassen gaat het vooral om de sierwaarde van de bloem. Voor vruchtgroenten zijn bloemen belangrijk omdat ze uitgroeien tot het gewenste product. De aanleg en uitgroei van bloemen is door temperatuur of door daglengte te reguleren (Van den Berg, 1987; Buwalda, 2003).

Roos

Onder praktijkomstandigheden bestaan er verschillen van 2 °C tussen rozenknoppen en zijn verschillen van 5-7 °C gemeten (Baas en Warmenhoven, 2003). Temperatuurswisselingen beïnvloeden het patroon van het assimilaten-transport van bladeren naar ontwikkelende rozenstengels over de dag, waardoor de kwaliteit van de bloem (knop) toe zou kunnen nemen. Het verhogen van de temperatuur in de late nacht en vroege morgen is een populaire strategie in de Nederlandse rozenteelt. Onafhankelijk van de hoeveelheid aangeboden licht, had het verhogen van de temperatuur geen invloed op het suiker- en zetmeelgehalte in bladeren en bloemknoppen. Een positieve DIF-behandeling had een toename van het zetmeelgehalte van de bloemknoppen als resultaat, maar had geen invloed op bloemkwaliteit bij de oogst (knopgrootte, knopafwijking) of de bewaarbaarheid. De lengte van de stengel en knopgrootte werden in geringe mate gereduceerd door het verhogen van de temperatuur in de eerste uren van de ochtend. Als er geen additioneel licht werd gegeven, was het aantal rozen met blauwe petiolen opmerkelijk hoog bij deze behandeling (Vogelezang *et al.*, 2000).

Chrysant

De bloemaanleg en uitgroei bij *Chrysant* wordt gestuurd door de daglengte. De temperatuur waarbij dit plaatsvindt heeft in het traject van 17-24 °C op de uitgroeiduur vrijwel geen invloed. Lagere en hogere temperaturen kunnen de bloei vertragen (Van der Ploeg en Heuvelink, 2006).

Diversen

Het verhogen van de etmaaltemperatuur van 16 naar 24 °C heeft geen effect op het aantal knopen onder de bloem, maar temperatuurspulsen van 32 °C gedurende 4 of 8 uur rond middernacht, gaven een toename van het aantal knopen, oftewel een fysiologisch vertraagde bloemformatie bij *Dianthus caryophyllus*. Hogere basistemperaturen gaven snellere knopvorming, maar het geven van temperatuurspulsen had niet dit effect. Hogere temperaturen en temperatuurspulsen in de nacht geven een hogere eerdere bloei (Kresten Jensen, 1997).

Verhoogde wortelzonetemperaturen versnelde de bloei bij *Saintpaulia* als gevolg van een algemene verhoogde groeisnelheid en een toegenomen bloemafplitsing en -ontwikkeling. Tabletverwarming reduceerde de teeltduur zonder nadelige gevolgen voor plantkwaliteit en bewaarbaarheid. Bij *Begonia* met hoge wortelzonetemperaturen (tot 29 °C) werd de bloei verminderd. Er werd ook een interactie met luchttemperatuur gevonden. Een afname van de wortelzonetemperatuur van 29 °C naar 23 °C of 16 °C in de generatieve fase was niet effectief tegen de verminderde bloei (Vogelezang, 1988). Tabletverwarming met een wortelzonetemperatuur van 30 °C reduceerde het aantal bloemen voor *Spathiphyllum* en de bloemkwaliteit werd negatief beïnvloed bij *Guzmania* (Vogelezang, 1990).

2.6 Vrucht en zaad

Voor de vruchtgroenten is de vorming van vruchten essentieel. Afhankelijk van het gewas is ook de vorming van zaden belangrijk. De vruchtzetting en de kwaliteit van het stuifmeel dat nodig is voor de bevruchting kan door temperatuur worden beïnvloed. De uitgroei van vruchten wordt in hoge mate bepaald door de temperatuur. Als de ontwikkeling van de vrucht in een jong stadium wordt verstoord, door bijvoorbeeld een gebrek aan assimilaten, kunnen vruchten aborteren. Dit verschijnsel treedt vooral op bij komkommer en paprika. De opname van voldoende calcium (Ca^{2+}) in de vruchten is belangrijk om neusrot te voorkomen.

Tomaat

Temperatuur is van invloed op de verdeling van assimilaten. Zo bevorderen hoge temperaturen de vruchtgroei ten koste van de vegetatieve delen bij tomaat (De Koning, 1989). Andere studies laten zien dat de toename van de groei zowel voor de vegetatieve als voor de generatieve delen geldt (Heuvelink, 1995). Vruchtabortie en groeireductie van nieuwe vruchten vormt het terugkoppelingsmechanisme om een teveel aan generatieve groei te verminderen bij verhoogde temperaturen (De Koning, 1989). Uit de praktijk blijkt dat een plotselinge koele periode kan leiden tot het scheuren van de vruchten doordat de wateropname groter is dan de celstrekking aankan (Jakupaj-de Snoo, 2006). Het assimilatentransport naar de vrucht vertoont gewoonlijk een optimumcurve met de vruchtgrootte. Ten opzichte van een vruchttemperatuur van 25 °C (controle), werd het assimilatentransport naar de vrucht verminderd door de vrucht af te koelen (5 °C) en werd het transport naar de vrucht bevorderd door de vrucht te verwarmen (35 °C). Afkoeling van de vrucht naar 5 °C veroorzaakte zelfs een translocatie van assimilaten uit de grootste gekoelde vruchten. De translocatiesnelheden werden beïnvloed door de ophoping of uitputting van zetmeel en onoplosbare residuen en door de concentratie van sucrose in de vrucht. De mogelijke afhankelijkheid van translocatiesnelheden en sucroseconcentratie van vruchtgrootte of sinksterkte heeft vaker ter discussie gestaan (Walker en Ho, 1977).

Vruchten die de gehele teelt opgroeiden bij een lagere temperatuur (20/20 °C) hadden een lagere groeisnelheid, maar temperatuur had geen invloed op de uiteindelijke vruchtgrootte (1^e en 2^e vrucht). Nagenoeg even grote vruchten resulteerde door compensatie tussen aantal cellen en celgrootte van de vrucht. Het grotere aantal cellen bij 20/20 °C ($9,0 \times 10^6$ tegen $7,9 \times 10^6$ bij 25/25 °C en $7,7 \times 10^6$ bij 25/20 °C) was het resultaat van een langere periode van celdeling, terwijl de kleinere celgrootte het resultaat was van een kortere expansieperiode, en niet van een lagere expansiesnelheid (Bertin, 2005). In eerdere studies resulteerde een verlaagde temperatuur tot grotere vruchten, maar dit betrof niet alleen de 1^e en de 2^e vrucht (De Koning, 1994; Ho, 1996; Adams *et al.*, 2001; Van der Ploeg en Heuvelink, 2005). Al eerder is aangetoond dat de gevoeligheid van tomatenvrucht varieert met het ontwikkelingsstadium (De Koning, 1994; Adams *et al.*, 2001; Adams en Valdés, 2002).

Het verwarmen van vruchten door de luchttemperatuur te verhogen met 4,5 °C voor een periode van (2x) een week, resulteerde aanvankelijk in een verhoogde productie, maar een verlaagde productie in de periodes erna, zodat geen

significant effect op de cumulatieve productie kon worden aangetoond. Het onderzoek toont aan dat het veranderen van de temperatuur wel van invloed is op het productiepatroon van tomaat. Onder invloed van de stralingswarmte van de zon, blijkt dat tomatenvruchten ongeveer 0,9 °C warmer zijn dan de bladeren (in het midden van de rijen), en dat ze ongeveer 1,9 °C warmer zijn aan de zonzijde van de rijen (Adams en Valdés, 2002).

Door het gebruik van buisverwarming op het 1^e en/of het 2^e net, een evt. groeibuis, door tabletverwarming, sterke (warmer) verlichting of andere vormen van plaatselijke verwarming, kan een verticale temperatuurgradiënt in het gewas ontstaan. Deze temperatuurgradiënt zal de groei en ontwikkeling van het gewas beïnvloeden en heeft effect op de assimilatenverdeling en afrijping van vruchten, zoals aangetoond bij tomaat (Dueck *et al.*, 2006).

Komkommer

Komkommerkwaliteit wordt niet negatief beïnvloed door lagere bodemtemperaturen (15-25 °C) (Krug en Thiel, 1985; Janse, 2003). Bij lagere luchttemperaturen (3 dagen 12 °C of 2,5 dagen 10 °C) met daarna temperatuurcompensatie, weken de vruchten (in aantallen, kilo's en kwaliteit) niet significant af van vruchten die bij hogere temperaturen werden geteeld (Janse, 2003). Kwaliteit werd wel negatief beïnvloed bij een of twee periodes van 6 dagen met een etmaaltemperatuur van 16 °C (Janse, 2003). De invloed van temperatuur (continu 17,5; 20,25 en 30 °C of een verhoging van 17,5 naar 27,5 °C) op aantallen vruchten en groei van de vrucht (Marcelis, 1993b; Marcelis en Baan Hofman-Eijer, 1993), liet zien dat een versnelde ontwikkeling (en kortere periode voor vulling van de vruchten) ruimschoots werd gecompenseerd door een grotere sinksterkte, ten koste van wortelgroei (Marcelis, 1994). Dit was voornamelijk het gevolg van celexpansie en niet van celdeling, en alleen als er voldoende assimilaten beschikbaar waren. Bij een tekort aan assimilaten nam het aantal cellen per vrucht af, en speelde een verandering in celdelingsnelheid geen rol. Bodemverwarming wordt aanbevolen om korte periodes van lage luchttemperaturen te compenseren, alhoewel het niet de luchtverwarming in het geheel kan vervangen (Liebig, 1985).

Diversen

Bij courgette had een behandeling zonder en met matverwarming tot 16 °C en een tijdelijk lage kasttemperatuur gevolgd door een periode met een hogere temperatuur geen duidelijk effect op bladkleur, productie of kwaliteit (Janse en Raaphorst, 2003). Acht dagen een temperatuur van 14,5 °C handhaven, had vijf weken later tot gevolg dat er tijdelijk nauwelijks of geen mannelijke courgette bloemen zichtbaar waren. Een periode een hogere etmaaltemperatuur handhaven, resulteerde later in meer mannelijke bloemen (Janse en Raaphorst, 2003).

2.7 Samenvatting expertkennis en beoordeling van de literatuur

2.7.1 Temperatuur

In het algemeen (en dus ook bij vruchtgroenten, potplanten en snijbloemen in de kas) is het zo dat een temperatuurverhoging van gewasdelen een hogere enzymatische activiteit met zich meebrengt, waardoor de 'sink'-sterkte en dus de groei in de verwarmde delen van het gewas, maar ook de ontwikkeling (fysiologische leeftijd) toeneemt. Dit is specifiek van invloed op de afsplitsingsnelheid van het blad en de stengelstrekking van het gewas. Worteltemperaturen mogen niet te laag worden om een goede groei van het wortelstelsel en nutriëntenopname te kunnen garanderen. Het verschil tussen de dag- en nachtwaarden van de gewas temperatuur en de absolute waarde daarvan, kan per gewassoort en -type in een verschillend effect resulteren. De manier waarop het gewas uiteindelijk verwarmd wordt is hier niet van invloed op.

De in de literatuur gevonden toegenomen groei en ontwikkeling door het verhogen van de worteltemperatuur, d.m.v. het verwarmen van het wortelmedium, de wortelmat, of d.m.v. tabletverwarming, kan het resultaat zijn van een goed en snel ontwikkeld wortelstelsel met een verhoogde opnamecapaciteit van water en voedingsstoffen, of van een opwaartse warmteflux door het gehele gewas (convectie van de lucht, niet van (warmer) sapstromen). Vooral bij lage (pot-) planten zullen deze laatste effecten van grotere invloed zijn dan in hogere (vrucht-) gewassen, omdat een

hogere worteltemperatuur al snel een hogere blad- en groeipunttemperatuur inhoudt. Bij vruchtgroenten, zoals bijvoorbeeld tomaat, bleek de verwarming van de wortels een positief effect op de productie te hebben, waarbij worteltemperaturen $>20\text{ }^{\circ}\text{C}$ vooral van belang zijn om de assimilaten ook naar het zich ontwikkelend wortelstelsel te sturen.

Stengeltemperaturen hoeven niet bijzonder hoog te zijn ($>12\text{ }^{\circ}\text{C}$) om het transport van assimilaten niet te hinderen en een ophoping van assimilaten in de bladeren te voorkomen. Voor de stengelstrekking (en de bloemstengelstrekking) is waarschijnlijk alleen de verwarming van het groeipunt van belang. De optimale groeipunttemperatuur voor de gewenste strekingsnelheid verschilt per gewasgroep en per cultivar.

Net zoals bij de stengel, is het voor de bladeren van belang dat ze boven een minimale temperatuur worden gehouden, waarbij de afvoer van assimilaten geen probleem vormt. Uit de literatuur lijkt dit niveau rond de $10\text{--}12\text{ }^{\circ}\text{C}$ te liggen voor de stengel te liggen, maar voor fotosynthese en het transport in het blad, moet temperatuur toch hoger zijn ($18\text{--}28\text{ }^{\circ}\text{C}$) doordat het meer enzymatisch werk vergt dan in de stengel. Onder dit niveau zijn sterke chlorose-verschijnselen waargenomen bij vruchtgroenten. Voor de bladafplitsingsnelheid is waarschijnlijk alleen de verwarming van het groeipunt van belang. De bladgroei wordt geremd bij lagere temperaturen, maar uit de literatuur blijkt niet dat de uiteindelijke bladgrootte hierdoor beïnvloed wordt.

In de literatuur worden kwaliteitsaspecten gerapporteerd bij het verwarmen van de knoppen/bloemen bij snijbloemen en potplanten. Het verwarmen van (alleen) de vruchten bij vruchtgroenten verhoogt de 'sink'-sterkte en daarmee de groeisnelheid van de vrucht positief beïnvloedt.

2.7.2 Luchtvochtigheid

In het algemeen is het zo dat een verlaging van de luchttemperatuur een verhoging van de luchtvochtigheid met zich meebrengt. Dit zou kunnen resulteren in condensatie van vocht op verschillende plantenonderdelen en daardoor het risico van ziektes zoals Botrytis of meeldauw doen vergroten. Een verhoging van vochtdeficit heeft een fysiologisch effect op de groei; doordat de verdamping minder sterk geremd wordt, zal er meer calcium (Ca^{2+}) naar de relatief sterker verdampende gewasdelen (i.h.a. de bladeren) stromen, en minder naar niet verdampende delen zoals de vruchten, waardoor er meer kans op neusrot in de vruchten ontstaat.

Bij het verwarmen van gewasdelen is het dus van belang om rekening te houden met de minimaal te handhaven temperatuur van die delen van de plant die niet specifiek verwarmd worden, om natslag en daarmee de kans op ziektes te voorkomen. Bij het tegelijk verlagen van de kastluchttemperatuur wordt deze kans kleiner. Als natslag niet voorkomen kan worden, is het van belang om een indruk te krijgen van de periode en duur bij een bepaalde vorm van deelverwarming.

2.8 Discussie

De ontwikkeling van elk van de onderdelen van een gewas kan beïnvloed worden door de temperatuur in meer of mindere mate te verhogen of te verlagen. In de literatuur zijn de effecten van het afzonderlijk verwarmen of koelen van specifieke gewasonderdelen (waarbij de rest van de plant op temperatuur gehouden wordt) nauwelijks beschreven. Door de complexe interactie van de temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid en het functioneren van een gewas, is het moeilijk in te schatten wat de totale effecten van veranderde verwarmingstechnieken zullen zijn. Wel kan het risico van natslaan van het gewas, met verhoogde kansen op Botrytis, gekwantificeerd worden.

Bij het nadenken over verwarming van gewasdelen is het zinvol niet alleen te kijken naar wat er op basis van de huidige techniek en complexiteit kan, maar ook na te denken over de vraag wat zou er gebeuren als het technisch mogelijk is om een bepaald gewasdeel apart te verwarmen en dan vooral voor die gewasdelen waar het nu nog niet wordt toegepast. Het doorrekenen van deze situaties behoort op dit moment niet tot de mogelijkheden.

Verwarming van de wortel

De worteltemperatuur moet goed afgestemd zijn op de temperatuur van de bovengrondse delen. In de praktijk is de worteltemperatuur het resultaat van de interactie tussen het teeltsysteem en de ruimtetemperatuur, maar dat zou anders kunnen zoals uit de literatuur blijkt. Worteltemperaturen van 20-25 °C zijn gewenst voor een goede ontwikkeling van het wortelstelsel, waardoor de opname van water en nutriënten en de productie van plantenhormonen (cytokinine) gewaarborgd blijft. In de beginfase van een gewas en bij (lage) potplanten kan warmteconvectie ervoor zorgen dat de wortels ook het overige deel van het gewas verwarmd wordt. Bij hoogopgaande gewassen kan wortelverwarming op deze manier slechts gedeeltelijk de effecten van een verlaagde ruimtetemperatuur opvangen, maar het is de vraag of deze warmte gewenst is, omdat het voornamelijk de stengels en bladeren verwarmt. Op theoretische gronden is het zeer onaannemelijk dat wortelverwarming de negatieve effecten van een lagere ruimtetemperatuur, zoals vertraagde vruchttuitgroei en aanleg van nieuwe bladeren bij hoogopgaande gewassen zou kunnen opvangen. Er zijn dan ook geen onderzoeksresultaten gevonden die hierop zouden kunnen duiden. Wel is gevonden dat een verhoogde worteltemperatuur zorgde voor een betere ontwikkeling van het bladoppervlak.

Verwarming van de stengel

Het transport door de stengel wordt nauwelijks beïnvloed door lagere stengeltemperaturen, tenzij de temperatuur extreem laag wordt. Het verwarmen van stengelwonden versnelt het helingsproces.

Verwarming van groeipunten (stengel, blad en bloem)

Een optimalisatie van de verwarming van het groeipunt van stengel, blad en bloem houdt in dat de afsplitsingssnelheid, groei (grootte) en ontwikkeling van het betreffende orgaan aangestuurd kan worden, zodanig dat geen afwijking hoeft te ontstaan ten opzichte van de situatie waarin de kaslucht het groeipunt verwarmt. Door specifiek de gewenste groeipunten te verwarmen en de gewenste kwantiteit en kwaliteit van de productie te handhaven, kan de verwarming van de kaslucht die de rest van de plantenonderdelen omringd substantieel verlaagd worden.

Verwarming van de vrucht

Een relatief hogere vruchttemperatuur ten opzichte van andere gewasdelen zal leiden tot een grotere 'sink'-sterkte, dus een toename van de relatieve verdeling van assimilaten naar vruchten ten koste van de koudere plantendelen. Een verhoogde vruchttemperatuur kan ook een snellere ontwikkeling van de vrucht veroorzaken. Bij beschikbaarheid van assimilaten zal de vrucht daardoor sneller groeien, maar de periode waarover dit gebeurt is korter. Het kiezen van de optimale temperatuur verschilt per gewas en is essentieel om het gewenste effect te bereiken. Bij paprika en tomaat zal de vruchtgrootte en het vruchtgewicht kunnen afnemen omdat ze sneller afrijpen. Bij komkommer zal eerder de gewenste vruchtgrootte zijn bereikt en is het gunstig om de vrucht door een hogere temperatuur sneller te laten uitgroeien.

Verwarming van de bloem

Verwarming van de bloem zal problemen met Botrytis verminderen. De bloem wordt een sterkere sink voor assimilaten en zal de groei van de andere plantendelen remmen. Bij *Chrysant* heeft extra warmte bij de bloemen vrijwel geen effect omdat de uitgroeiduur vooral door de daglengte wordt gestuurd. Bij Roos en *Gerbera* zullen bloemen sneller tot ontwikkeling komen, met mogelijk negatieve gevolgen voor de houdbaarheid en de bloemgrootte. Een roos zal daarbij minder gevuld worden.

Verwarming van het blad

Als de bladeren warmer worden omdat de opgelegde kasluchttemperatuur nodig is voor andere processen en delen in het gewas, zoals voor de afsplitsing van nieuwe groeipunten of het vergroten van de 'sink'-sterkte van bloemen en vruchten, zal de verdamping van de bladeren toenemen en dit kost energie. Extra verdamping brengt extra vocht in de kas, waardoor een situatie kan ontstaan die ongunstig is voor de kwaliteit en voor de productie van een kasgewas. Bij een te hoge luchtvochtigheid moet deze worden afgevoerd en dat is weer ongunstig voor de totale energiehuishouding van de kas. Het verwarmen van het blad is dus nooit een doel op zich, maar een ongewenste bijwerking, omdat de benodigde temperaturen voor de functie van de bladeren lager liggen.

De temperatuurverschillen tussen bladeren zoals die nu in een kas voorkomen zijn minder gunstig om een optimaal rendement van de fotosynthese te krijgen. Een systeem dat zorgt voor een homogenere bladtemperatuur zou in dat perspectief een positief effect op de totale productie moeten kunnen hebben.

Voor energietransport in een kas is een verschil in energie-inhoud (enthalpie) binnen de kas nodig, alleen als er geforceerde luchtbeweging is zal dit verschil gering kunnen zijn om toch voldoende energietransport te krijgen.

2.9 Conclusies

- De worteltemperatuur is in de praktijk niet afgestemd op de bovengrondse gewasactiviteit, maar volgt uit de aangehouden kasluchttemperatuur. Als de kasluchttemperatuur verlaagd wordt, moet de worteltemperatuur op zodanig niveau gehouden worden dat wortelontwikkeling en hormoonproductie geen beperkingen opleggen aan de gewasgroei en gewasproductie
- De bladtemperatuur is in de praktijk niet homogeen. Een temperatuurverhoging van de koudere delen veroorzaakt meer verdamping die energetisch ongewenst is. Homogeniteit moet worden nagestreefd met handhaving van de gemiddelde temperatuur
- De bladtemperatuur zou verlaagd kunnen worden als de kasluchttemperatuur ook verlaagd wordt, zodat aan de randvoorwaarde van een verminderde kans op natslag wordt voldaan
- Een relatieve verhoging van de vrucht- en bloemtemperatuur kan de 'sink'-sterkte vergroten en de ontwikkeling van het gewasdeel versnellen, maar heeft als risico dat de rijpingsperiode of uitgroeiperiode korter wordt, waardoor een lager vrucht- of bloemgewicht en daarmee een lagere kwaliteit wordt bereikt
- Het transport door de stengel wordt nauwelijks beïnvloed door lagere stengeltemperaturen, tenzij de temperatuur extreem laag wordt. De stengeltemperatuur zou verlaagd kunnen worden. Het helingsproces van stengelwonden verloopt wel sneller bij hogere stengeltemperaturen
- Verandering van de temperatuur van een groeipunt kan de ontwikkeling (en kwaliteit) van een plant sturen
- Verwarming van een specifiek plantendeel zal de source/sink verhoudingen in een plant en de niveaus van plantenhormonen in een plant wijzigen; deze gewijzigde plantbalans vraagt om een gewijzigde teeltstrategie
- Verandering van de ontwikkeling van de plant moet de balans tussen aanmaak en vraag naar assimilaten niet zodanig verstoren dat de plant in de volgende periode niet optimaal kan groeien; met dit lange termijn effect moet bij verwarming van afzonderlijke plantendelen rekening worden gehouden

Er is in de loop der jaren een flink aantal populaire artikelen verschenen dat soms op basis van wetenschappelijke onderzoeksprojecten in verscheidene vakbladen terecht is gekomen. Deze artikelen zijn waar mogelijk in deze studie geïntegreerd en geven een goed beeld van de praktijkkennis en zijn vaak toegankelijker dan de wetenschappelijke literatuur. Deze publicaties zijn zeer aanbevelingswaardig en referenties hiervoor zijn opgenomen in Bijlage 3.

Op basis van de voorliggende hoofdstukken is de conclusie dat de temperatuur van blad en stengel wel wat lager mag. Op het ogenblik is de aangehouden kasluchttemperatuur geoptimaliseerd voor verschillende processen die tegelijkertijd plaatsvinden (bijv. afsplitsingsnelheid van bladeren en bloemen en de uitgroei van organen) en voor het handhaven van de 'sink'-sterkte van bepaalde organen, waardoor andere plantendelen meer of langer dan nodig verwarmd worden. Bij een verlaagde kasluchttemperatuur kan de temperatuur van blad en stengel ook omlaag, zonder dat de productie achteruit gaat en/of de kans op natslag vergroot wordt. Wel is het nodig om door middel van specifieke verwarming de temperatuur van groeipunten zo af te stemmen dat de afsplitsingsnelheid van bladeren en bloemen op peil gehouden wordt. Specifieke bloem- en/of vruchtverwarming kan dan de 'sink'-sterkte sturen die nodig is om de kwantiteit en de kwaliteit van de productie te handhaven. De worteltemperatuur zou verlaagd mogen worden tot een niveau waarop de groei en ontwikkeling van de wortels optimaal zijn en de aanmaak van hormonen niet gehinderd wordt.

Het specifiek verwarmen van delen van het gewas is echter nog nauwelijks beproefd, en is technisch misschien moeilijk uitvoerbaar, bijvoorbeeld om lichtverlies daarbij te beperken, of economisch onaantrekkelijk vanwege de hoge arbeidsinzet. De specifieke reactie van een gewas dat slechts op plekken en/of periodes verwarmd wordt is ook nog een grote onbekende die nader onderzocht zou moeten worden.

3 Verkenning van verwarmingssystemen

3.1 Warmteoverdracht

Voor de warmteoverdracht van een verwarmingselement, bijvoorbeeld verwarmingsbuizen, naar de omgeving zijn twee processen van belang: **Convectie** en **Straling** (zie kader hieronder). Bij veranderingen in de configuratie van het verwarmingssysteem kan de verhouding van deze twee stromen zodanig veranderen dat dit invloed heeft op de gewastemperatuur en het kasklimaat en uiteindelijk ook op het energiegebruik.

Convectie

Bij convectie wordt door middel van stroming de warmte overgedragen. Omdat er sprake moet zijn van stroming, komt warmteoverdracht door convectie alleen voor in gassen (zoals bijvoorbeeld in de kaslucht) en in vloeistoffen. De kaslucht die daadwerkelijk contact maakt met de buis, wordt door geleiding opgewarmd. Omdat bij opwarming de lucht lichter wordt zal deze gaan opstijgen en worden vervangen door koelere lucht uit de omgeving. Zolang de stroming die hierdoor ontstaat zonder hulpmiddelen (zoals een ventilator of pomp) plaatsvindt is er sprake van natuurlijke convectie, anders spreekt men van gedwongen of geforceerde convectie.

Straling

Bij stralingsverwarming vindt er energietransport plaats zonder dat er tussen de twee voorwerpen een middenstof aanwezig is die door warmtegeleiding de energie overdraagt. Elk voorwerp zendt via warmtestraling energie uit naar de omgeving. De intensiteit van dit proces neemt met de vierde macht toe met de absolute temperatuur van het voorwerp. Twee voorwerpen met verschillende temperaturen, waarbij geldt dat er tussen deze voorwerpen geen fysieke hindernissen mogen bestaan, zullen stralingsenergie uitwisselen, zodanig dat het voorwerp met de lagere temperatuur meer ontvangt dan dat het uitzendt en daarmee warmer wordt, terwijl het andere voorwerp meer straling uitzendt dan het ontvangt en per saldo kouder wordt.

Verhouding convectie/straling

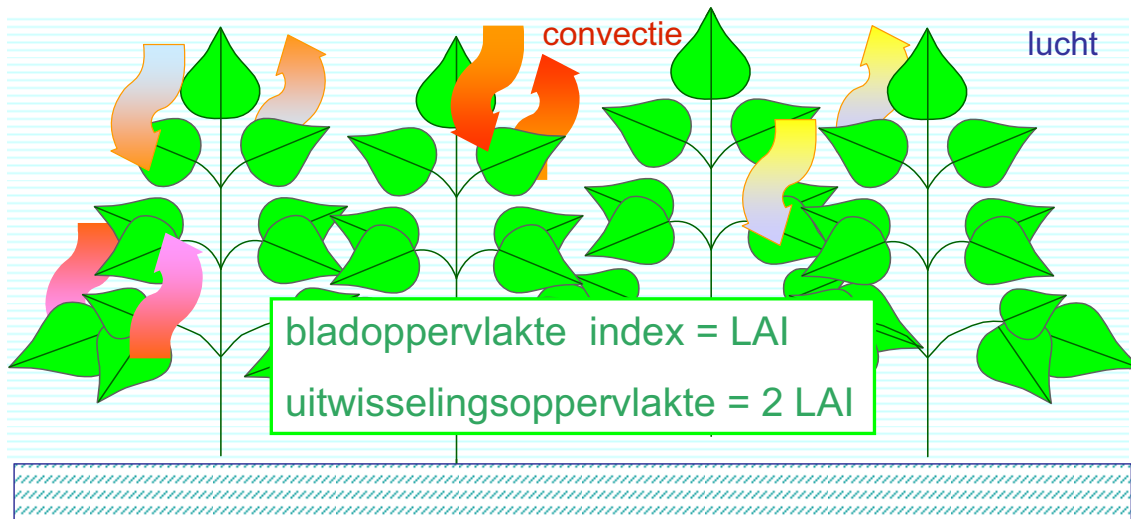
De verhouding tussen convectie- en stralingsafgifte van de verwarmingsbuizen is in het temperatuurbereik dat in de glastuinbouw gebruikelijk is ongeveer 50/50. Bij stralingsverwarming kan deze verhouding oplopen tot 20/80. Voor assimilatiebelichting (lampen) geldt dat ongeveer 55% van de elektrische energie die naar de lamp gaat wordt omgezet in stralingswarmte en 45% in convectiewarmte. Van de 55% stralingsenergie is ca. 30% voor de plant bruikbaar licht (PAR) en de overige 25% is stralingswarmte. Uiteindelijk wordt slechts 1-2% echt omgezet in chemische energie in het fotosyntheseprocess en de rest wordt uiteindelijk ook warmte na absorptie door het gewas.

3.2 Warmteoverdracht bij kasgewassen

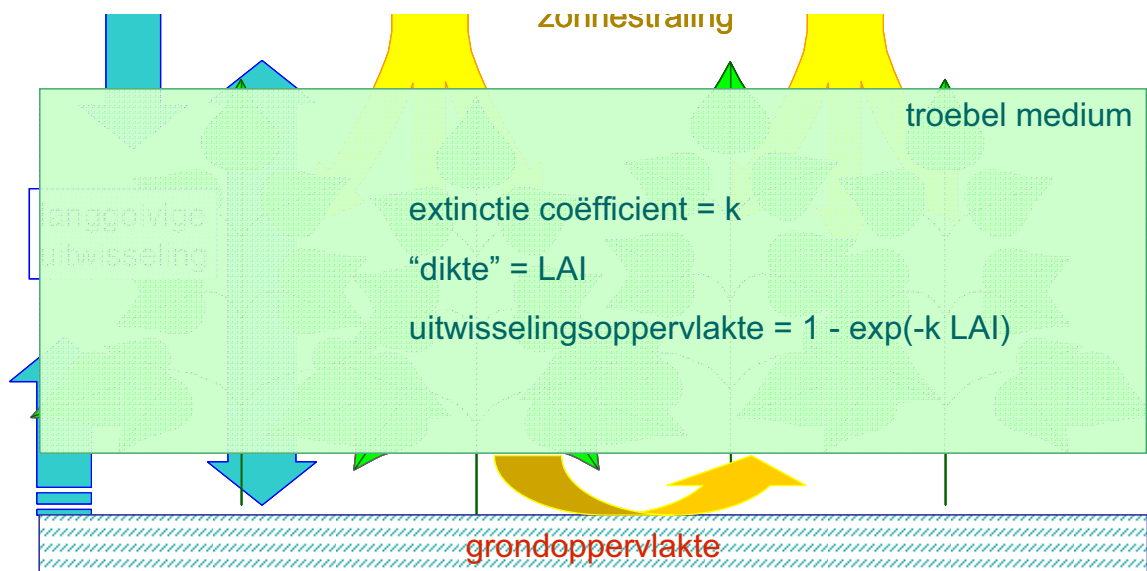
3.2.1 Basisprincipes

Ook het gewas kan energie uitwisselen met de omgeving o.a. door convectie en straling. Alle bladeren en blaadjes dragen bij aan het uitwisselen van warmte met de omringende lucht, dus m.b.t. convectie gedraagt het gewas zich als een warmtewisselaar met 2 keer het bladoppervlak (elke zijde van elke blad) als uitwisselend oppervlak (Figuur 3.1).

Bij de absorptie/uitwisseling van straling gaat het anders, door het feit dat bladeren elkaar kunnen 'beschaduwen', niet alleen voor zonlicht, maar ook voor het uitwisselen van langgolvlige straling (zoals hierboven geschreven). Een blad diep in het gewas, zal bijvoorbeeld grotendeels straling uitwisselen met de andere bladeren in het gewas en zal heel weinig uitstralen naar het kasdek. Omdat de temperatuurverschillen tussen de bladeren relatief klein zijn, is vrijwel alleen de straling door de bladeren die 'blootgesteld' zijn aan de stralingsbron oftewel de 'put' van belang.

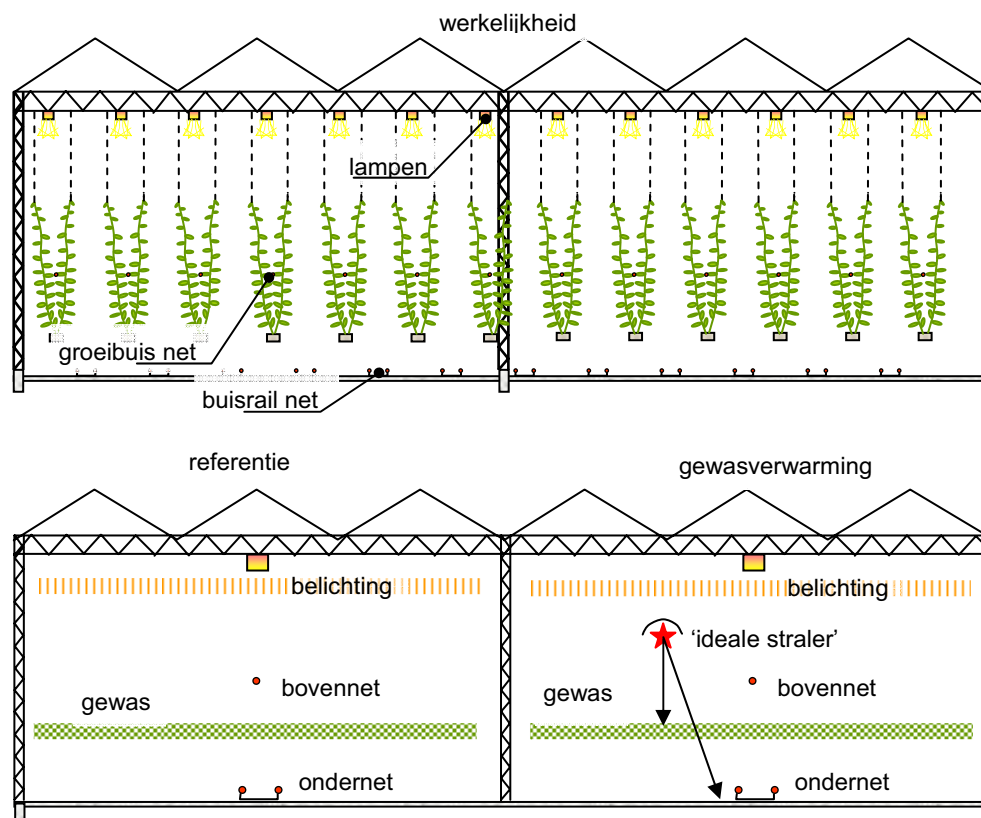


Figuur 3.1. Schematische weergave van het modelmatige omschrijving van de stralingsuitwisseling van een gewas.



Figuur 3.2. Schematische weergaven van de vertaling van de werkelijkheid naar het Kaspro model.

Zoals in Figuur 3.2 wordt aangegeven, is dit in modellen verwerkt door het gedrag van straling in een gewas te omschrijven als in een troebel medium. Dat betekent dat het gewas wordt omschreven als een semitransparante laag van materiaal, met een eigenschap 'extinctie coëfficiënt' en dikte 'd'. In de praktijk wordt het bladoppervlakte index (LAI) gebruikt als maat voor de 'dikte' en wordt de extinctie coëfficiënt (uitdoving) experimenteel bepaald (het heeft o.a. te maken met bladorientatie). Dit betekent dat in kasklimaatmodellen het gewas wordt omschreven als een homogene laag, waarbij verschillen (temperatuur, vochtigheid, stralingsabsorptie) op lokale schaal niet voorspeld kunnen worden.



Figuur 3.3. Schematische weergaven van de vertaling van de werkelijkheid naar het KASPRO model.

In Figuur 3.3 is schematisch uitgelegd hoe de werkelijkheid in het KASPRO model is vertaald. In deze figuur is als uitgangssituatie een belichte teelt genomen, waarbij twee verwarmingsnetten aanwezig zijn. In het subfiguur 'referentie' is de vertaling van de werkelijkheid naar het standaard kasklimaatmodel gemaakt. Een kas in het simulatiemodel wordt teruggebracht naar 1 m². Deze ene m² heeft alle eigenschappen van de kas die representatief zijn voor deze vierkante meter. Bijvoorbeeld: als in werkelijkheid er 10 x 51 mm buizen als ondernet in een tralie van 8 meter zijn, dan heeft deze ene vierkante meter 1,25 x 51mm buis. Ieder verwarmingselement zal afhankelijk van de locatie waar het geplaatst is lokaal convectiewarmte afgeven.

Voor de stralingscomponent is dat wat ingewikkelder omdat stralingsuitwisseling altijd tussen twee oppervlakten gaat. Hierbij is het van groot belang te weten hoeveel zicht ('view'-factor) die twee oppervlakten naar elkaar hebben. Zo zullen twee oneindige platen die evenwijdig aan elkaar lopen elkaar voor 100% 'zien'. Een ronde verwarmingsbuis zal echter maar maximaal 50% van de bodem 'zien' en als er geen gewas en andere constructiedelen zijn, zal de andere 50% naar het kasdek 'kijken'. Waar in werkelijkheid een hoog opgaand gewas aanwezig is, wordt het gewas in de modelbenadering, gezien als een plat vlak. Dit betekent dat er ook maar één gewastemperatuur is.

In de referentiesituatie wordt afhankelijk van de teelt, de voor die teelt gebruikelijke bedrijfsuitrusting ingezet. Zo kunnen er ook schermen en/of vloerverwarming aanwezig zijn (niet afgebeeld in Figuur 3.2). In de referentiesituatie, wordt een teelt doorgerekend, waarbij ook een gewastemperatuur wordt bepaald. Deze gewastemperatuur is afhankelijk van de inzet van de bedrijfsmiddelen. Wordt bijvoorbeeld het scherm gesloten, dan zal het scherm als een blokkade optreden tussen het gewas en het koude kasdek. Hierdoor ontstaan er minder warmteverliezen van het gewas waardoor de gewastemperatuur gaat stijgen. Ook belichting heeft een verhoging van de gewastemperatuur tot gevolg.

3.2.2 Semigesloten teelten

De temperatuurverdeling in kassen is al jaren een onderwerp van discussie (Campen en De Gelder, 2007). Voor het gewenste energietransport in een kas moet er een temperatuurgradiënt bestaan. De telers streven er naar om deze in het horizontale vlak zo klein mogelijk te houden om de gewasontwikkeling op alle plaatsen gelijkmatig te laten verlopen. Aan de ene kant zijn de bronnen van warmte: instraling van de zon, verwarmingsbuizen, tablet- en bodemverwarming. Deze bronnen zorgen voor temperatuurgradiënten omdat er plaatsen zijn waar de warmte de kas verlaat zoals het kasdek en de luchtramen die zorgen voor afkoeling van de kaslucht. De warmteoverdracht door straling en convectie van het gewas naar de omgeving is afhankelijk van de omgevingsfactoren. Teler hebben geleerd om de verschillen in temperatuurverdeling zo goed mogelijk te benutten en schade door plaatselijke opwarming, als gevolg van verbranding door de zon, of afkoeling als gevolg van uitstraling naar een koud kasdek en natslag bij langzame opwarming van massieve plantedelen, te beperken.

Met de introductie van nieuwe klimaatbeheersingstechnieken zoals luchtbevochtiging en actieve koeling ontstaan er extra mogelijkheden om de temperatuur in de kas op verschillende plaatsen te sturen. Uit het onderzoek met semigesloten kassen met geforceerde luchtbeweging en actieve koeling is bekend dat de temperatuurgradiënt in verticale richting in een kas zeer groot kan worden. De installaties zijn ontworpen om met een geringe verplaatsing van lucht een maximale koeling te realiseren. Daarbij wordt koude lucht de kas ingeblazen die op het moment van aanzuigen bij de koelinstallatie maximaal moet zijn opgewarmd. Hierdoor kunnen voor het gewas nieuwe omstandigheden ontstaan, zoals bij komkommer koele vruchten onderin het gewas, terwijl de gewaskop warm wordt door de zon. De verhouding in ontwikkelingssnelheid van de vrucht en de gewastop worden hierdoor anders. Een andere temperatuurverdeling heeft gevolgen voor de verhouding in 'sink'-sterkte tussen vrucht en groeipunt bij hoog opgaande gewassen. De situaties waarin zich dit voordoet is vooral op het moment van koeling van de kaslucht bij veel instraling. Bij gebruik van bevochtiging wordt veelal de kaslucht bovenin de kas afgekoeld waardoor de verdamping van de plant minder oploopt. De planttemperatuur zal dan veranderen.

Over de gewenste temperatuurverhouding tussen de top van het gewas, de vruchten en de wortels bestaan vanuit de semigesloten teelt veel vragen. De situatie is wel anders dan bij de benadering van bewust verwarmen van gewasdelen in dit rapport, maar de vraagstelling heeft duidelijke overeenkomsten. De verhouding tussen ontwikkelingssnelheid van de verschillende gewasdelen heeft invloed op de 'source-sink' balans. De vraag is of de verhouding in ontwikkeling en 'source-sink' door middel van een gericht verwarmen van een gewasdeel kan leiden tot een netto energiebesparing omdat minder warmte in een kas wordt gestopt om de gehele kas op temperatuur te houden.

3.3 Alternatieve vormen van verwarming

Het uitgangspunt van deze studie is dat het gewas verwarmd moet worden, en niet de lucht of de vloer zoals in gangbare verwarmingssystemen in de kasteelt. Over het algemeen wordt de kaslucht zo gestuurd dat de optimale temperatuur ontstaat voor een goede ontwikkeling en kwaliteit van het hele gewas. Dat daarvoor bepaalde delen van het gewas een hogere temperatuur aangeboden krijgen dan strikt noodzakelijk voor hun functie, kan gezien worden als een inefficiëntie van het verwarmingssysteem zoals dat nu gangbaar is.

De vraag die hier opgelost moet worden is op welke manieren het mogelijk zou zijn om slechts geselecteerde gewasdelen te verwarmen. Om deze vraag op te lossen is met een aantal onderzoekers met jarenlange ervaring in de glastuinbouw nagedacht over de alternatieve verwarmingsmogelijkheden. Daarvoor is in de brainstormsessie (Hoofdstuk 3.3.1) er geen beperking opgelegd wat betreft de technische uitvoerbaarheid van de ideeën. In het tweede deel (Hoofdstuk 3.3.2) is een aantal stellingen geponeerd, waarvan de discussie wordt gepresenteerd. Het doel van brainstorm en discussie was om tot situaties te komen die door modelberekeningen gekwantificeerd zouden kunnen worden.

3.3.1 Brainstorm

Mogelijkheden voor gewas(deel) verwarming worden gezien in de verwarming of handhaving van de temperatuur van groeipunten en vruchten, terwijl andere gewasdelen niet verwarmd hoeven te worden. Een uitzondering daarop zou het wortelstelsel moeten zijn, dat zodanig ontwikkeld moet worden dat het geen beperkingen oplegt aan de groei van het bovengrondse deel van het gewas. Water- en nutriëntenopname, als ook de productie van plantenhormonen moeten gewaarborgd blijven. Bovendien kan met de aansturing van de temperatuur van het wortelmedium invloed uitgeoefend worden op kieming en begingroei van een gewas.

Niet alle systemen die ter sprake zijn gekomen zijn in staat om zich specifiek te richten op slechts een deel van het gewas. Vaak bestaat er een interactie met het gewas of de kaslucht waardoor de toepassing van de alternatieve verwarmingsvorm niet haalbaar lijkt. In een brainstormsessie zijn een aantal energiebesparende ideeën naar boven gekomen die in meer of mindere mate te complex zijn om dor te kunnen rekenen. Toch worden ze hier genoemd.

Energiebesparing door terugdringen warmteafgifte

Een aantal voorbeelden van energiebesparing door het terugdringen van warmteafgifte van gangbare verwarmings- en belichtingsvormen, zijn:

- Het gebruik van een 'perfecte lamp' (bijv. LED belichting) in plaats van SON-T lampen. In tegenstelling tot de SON-T, geeft een 'perfecte lamp' geen warmtestraling. Het PAR rendement zou wel aangepast moeten worden
- Het gebruik van infraroodstralers of -panelen. Een probleem daarbij is dat de kaslucht ook via het gewas verwarmd wordt omdat de bladeren functioneren als warmtewisselaar
- Het gebruik van katalytische stralers

Energiebesparing door effectievere verwarmingsvormen

- Beïnvloeden temperatuurgradiënt
- Scherm in het pad waaronder extra wordt verwarmd
- Luchtslang met gerichte warme lucht
- Stralingswarmte (meer straling dan convectie)
- Verwarming tussen gewas ipv erboven/eronder
- Alternatieve buisvormen: waterinhoud, sneller reactie mogelijk op buiten/kasluchttemperatuur

Energiebesparing door gerichte verwarming van plantenonderdelen

- Wortelverwarming en -koeling door elektrisch of met slangen
- Groeipuntverwarming (belichting, buis)
- Delen verwarmen via luchtzakken (kleiner volume verwarmen: geeft misschien problemen met vocht en/of CO₂)
- Schermen (kas verkleinen)
- Klem (verwarmingselement, zoals bij sapstroommeter)
- Bespuiten met zeoliet dat door opname van water warmte afgeeft

Discussiepunten / Opmerkingen:

- Het belichten van de kop van een gewas geeft ook al stralingswarmte
- Scherm kan niet te dichtbij het gewas (verkleinen verwarmde ruimte) vanwege vochtproblemen
- CO₂ effecten op potplanten zijn is nauwelijks bekend
- Potplanten lijken niet zo interessant om (gedeeltelijk) te gaan verwarmen
- Fijnmazig net boven gewas: kost (teveel) licht
- Groeipuntverwarming: nog nooit geprobeerd voor verwarming
- Wortelverwarming als groeipunt van het gewas zich dicht bij de mat bevindt

3.3.2 Discussiestellingen

Naar aanleiding van de brainstormsessie (Hoofdstuk 3.3.1) is er een aantal discussiestellingen opgesteld, die door een panel van experts uit het praktijkonderzoek en het theoretisch onderzoek zijn bediscussieerd. De stellingen luiden:

1. 5% energiebesparing door gewas(delen) te gaan verwarmen is niet haalbaar en niet interessant omdat de noodzakelijke investering in het verwarmingsysteem en een eventueel lichtverlies de besparing teniet zal doen
2. Het is voor gewas(deel)verwarming in de praktijk onmogelijk onderscheid te maken tussen plantendelen, hoogstens tussen ondergrondse en bovengrondse delen
3. Bij elke vorm van gewas(deel)verwarming in plaats van kasluchtverwarming, behoren vochtproblemen tot de verleden tijd

In de discussie kwam naar voren dat bovengenoemde energiebesparing van (minstens) 5% mogelijk lijkt, als warmteverliezen door convectie en straling door deelverwarming beperkt zouden kunnen worden. Technologische ontwikkelingen zullen moeten doorzetten (en economisch aantrekkelijk blijven) om deelverwarming mogelijk te maken, waarbij rekening gehouden moet worden dat naast de gerichte verwarming van die onderdelen die warmte behoeven (wortels, groeipunten en vruchten) er aandacht besteed moet worden om de warmteverliezen naar de omgeving te beperken. Ook zouden deze innovaties rekening moeten houden dat de instraling niet beperkt wordt, of dat een ongewenste vochtuithouding ontstaat.

Het beperken van warmteverliezen zou aan de ene kant mogelijk moeten zijn door isolatie en beperking van de convectieruimte en in de tweede plaats door uitstraling van het gewas te reduceren, door bijv. temperatuurverschillen tussen gewas(delen) en de omgevingstemperatuur te verkleinen. Wat betreft de laatste optie, is het telen bij (iets) lagere luchttemperaturen een interessante, omdat deze temperaturen vaak hoger liggen dan strikt noodzakelijk voor de fotosynthese. Vanwege de gerichte verwarming van gewasdelen, zou minder kans bestaan op natslag van die delen.

Naar aanleiding van de brainstormsessie (Hoofdstuk 3.3.1) en de discussie (Hoofdstuk 3.3.2) worden een aantal modelaanpassingen voorgesteld, die het mogelijk maken om een gekwantificeerd beeld te geven van de verschillende vormen van deelverwarming.

3.4 Modelaanpassing

Door de beperkingen van de simulatiemogelijkheden met betrekking tot de verwarmingsvormen, is het niet mogelijk om alle gedachtegangen over mogelijke alternatieven om gewasdelen te verwarmen in het model te implementeren. Het gaat hierbij om het onderscheid dat gemaakt moet worden tussen het deel van het gewas dat wordt verwarmd, en de gewasreactie hierop die vooralsnog onbekend is. Voor het 'lokaal' verwarmen van een gewas is de stralingscomponent een erg nuttige omdat bij convectieverwarming de warmteoverdracht indirect via de lucht gaat, en deze lucht als gevolg van deze opwarming ook in beweging wordt gebracht, waardoor de warmte zich gaat verdelen. Om nu zo effectief mogelijk de gewastemperatuur te kunnen beïnvloeden, is er in het model een 'energie-infuus' geïntroduceerd die in het model is geïmplementeerd als een 'ideale straler' (zie Figuur 3.2).

Het 'energie-infuus' kan direct warmte in het gewas brengen. Het houdt hierin dat 100% van de ingebrachte energie ook daadwerkelijk op het te verwarmen oppervlak wordt ingebracht. In de praktijk zal een 'energie-infuus' niet mogelijk zijn, en zal een 'ideale straler' nooit 100% efficiëntie bereiken (zie kader in Hoofdstuk 3.1). In de praktijk wordt niet alle door de straler uitgestraalde energie daadwerkelijk door het gewas geabsorbeerd. In deze simulatie is daarom gewerkt met een extinctieformule (Stanghellini, 1987). Het stralingsdeel dat niet door het gewas wordt opgevangen komt op de bodem (of andere onderdelen van de kasuitrusting) terecht. De hier beschreven situatie geldt als de straler boven het gewas is geplaatst en naar beneden uitstraalt. Bij een omgekeerde plaatsing (straler onder het gewas en naar boven gericht), zal het deel dat niet door het gewas wordt onderschept op het scherm (indien gesloten) of anders op het kasdek terecht komen.

Het is bekend dat het verlagen van de setpoint een (flinke) energiebesparing kan opleveren (bijv. 2 °C jaarrond lager, bespaart op jaarbasis 13% (tomaat) (bijv. Dueck *et al.*, 2004a; Dueck *et al.*, 2004b). Om een zinvolle vergelijking te kunnen maken is gekozen voor alternatieve verwarmingssystemen waarbij de berekende gewastemperatuur hetzelfde blijft als bij de referentieverwarming. Dit is geïmplementeerd door bij het inzetten van de gewasverwarming ('ideale straler') het 'setpoint verwarmen' dat de luchttemperatuur regelt met enkele graden te verlagen, waarna een regelaar net zoveel energie in de straler stopt tot eenzelfde gewastemperatuur als in de referentiesituatie bereikt wordt. Doordat een lagere luchttemperatuur geaccepteerd wordt, zullen de verwarmingsbuizen minder energie hoeven in te brengen. Daar staat tegenover dat er nu wel energie in de straler moet worden gestoken. Uiteindelijk zal dan bepaald worden wat de energiestromen in de nieuwe situatie worden ten opzichte van de referentie.

Tevens is er een situatie doorgerekend waarbij niet met een 'ideale straler' (met extinctieverliezen), maar met een 'energie-infuus' (zonder extinctieverliezen) is gewerkt, om aan te geven wat de maximaal haalbare energiebesparing zou kunnen zijn. Een tweetal situaties is als voorbeeld doorgerekend voor een donkere, koude nacht in april (met en zonder scherm).

3.5 Conclusies en simulatiescenario's

In de huidige kas- en gewasmodellen bestaat niet de mogelijkheid om binnen een gewas op onderdelen met verschillende temperaturen te rekenen. Het model simuleert een homogene gewastemperatuur. Deze modellen zijn gevalideerd voor praktijksituaties waarin de klimaatregeling (inclusief temperatuur) op het gehele gewas en de kaslucht plaatsvindt, waarbij het effect van verschillende stralingsbronnen en verwarmingsbronnen wordt meegenomen en aangepast aan het externe condities zoals de buitentemperatuur (Figuur 3.3).

Er is gerekend voor drie verschillende gewasgroepen met tussen haakjes een representatief gewas:

1. Vruchtgroenten (tomaat)
2. Snijbloemen (roos)
3. Potplanten (Spathiphyllum)

De bedrijfsuitrusting en de setpoints van deze 3 teelten worden voor de referentieteelten en referentieverwarming beschreven in Bijlage 1 (Hoofdstuk 8.1). In de referentieberekening wordt de gewastemperatuur bepaald waaraan in de vervolgberekeningen getoetst wordt wat de gevolgen van de veranderde regeling of inzet van bedrijfsmiddelen zal zijn. De regelgrootte zal de gewastemperatuur zijn, waarbij de in de referentie bepaalde gewastemperatuur het uitgangspunt zal zijn.

Naast de inzet van de in de vorige paragraaf beschreven 'ideale' straler, kan de verhoudingen PAR (Fotosynthetisch Actieve Straling) / NIR (Nabij Infrarood) / voelbare warmte van de lampen worden aangepast, waarmee dus ook 'perfecte lamp' of 'ideale straler' kan worden gesimuleerd. Onder een 'perfecte lamp' wordt een lichtbron verstaan die uitsluitend PAR afgeeft en een beperkte hoeveelheid voelbare warmte produceert. Om de fotosynthese en gewasproductie niet te beïnvloeden, wordt het elektrisch vermogen van de lampen zodanig aangepast dat het PAR vermogen van de lampen gelijk blijft aan de referentiesituatie. Als laatste

Samengevat zijn de stuurmogelijkheden:

1. Inzet van een 'energie-infuus' (zonder extinctieverliezen van de gekozen verwarmingsmethode) met daarbij een verlaging van de kasluchttemperatuur
2. Inzet 'ideale straler' (met extinctieverliezen) met daarbij een verlaging van de kasluchttemperatuur
3. Verhouding PAR / NIR / convectie van lampen wijzigen

4 Berekeningen met alternatieve verwarmingssystemen

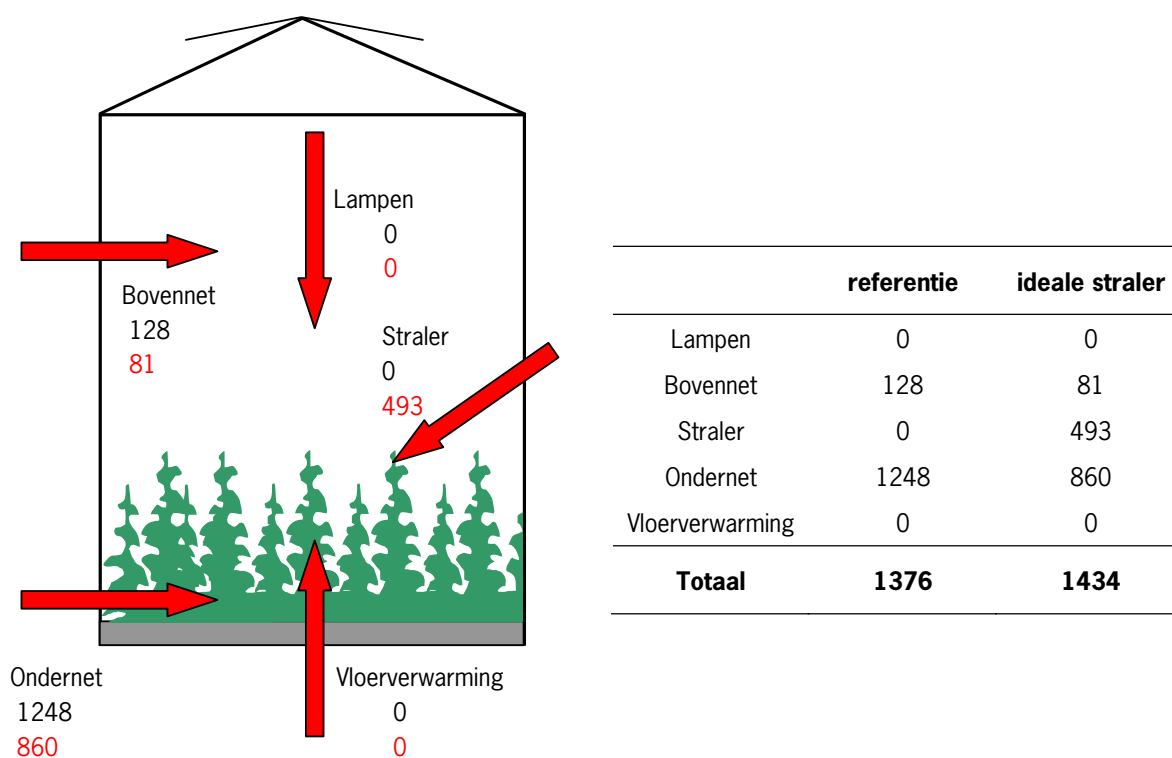
4.1 KASPRO - berekeningen energieverbruik van alternatieve verwarmingssystemen

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de geselecteerde alternatieve verwarmingssystemen, zoals beschreven in de paragrafen 3.3 en 3.5 uitgewerkt. De volgende stuurmogelijkheden zijn daarbij ingezet:

1. Inzet 'energie-infuus' (zonder extinctieverliezen) met daarbij een verlaging van de kasluchttemperatuur: (Bijlage 2)
2. Inzet 'ideale straler' (met extinctieverliezen) met daarbij een verlaging van de kasluchttemperatuur
3. Verhouding PAR / NIR / convectie van lampen wijzigen (als simulatie van een 'perfecte lamp')

De gevolgen van de gewijzigde regeling zal vergeleken worden met de resultaten van de referentieteelten, zoals beschreven in Bijlage 1 (Hoofdstuk 8.1).

4.1.1 Alternatieve verwarming tomaat



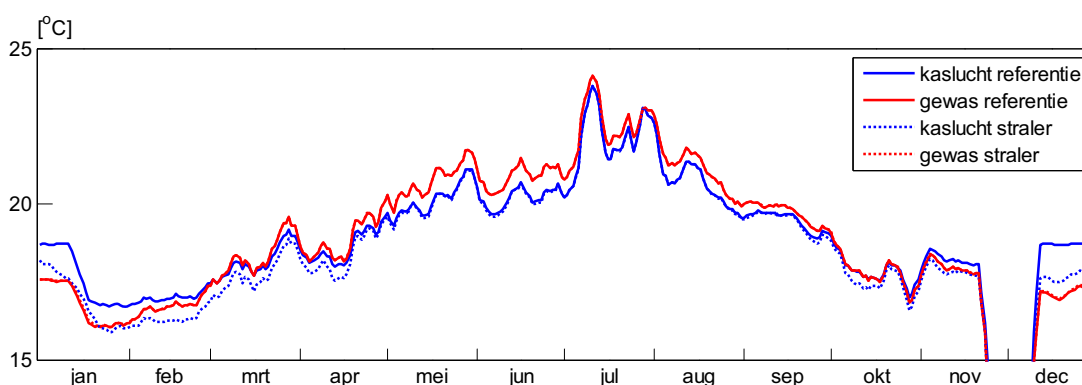
Figuur 4.1. Energiebronnen (gesimuleerd verbruik in MJ m²) voor een referentieteelt van tomaat (zwarte getallen, boven) en met de ideale straler (rode getallen, onder).

Inzet ideale straler

De grote vraag bij toepassing van dit alternatieve verwarmingssysteem, is of het ook energiezuiniger is? In Figuur 4.1 is de energie-input van beide verwarmingssystemen en de ideale straler weergegeven. De referentiegetallen zijn in het zwart boven de berekeningsresultaten met de ideale straler (rood) weergegeven. Het ondernet gaat een veel kleiner deel van de totale warmtebehoefte in de kas leveren. De ideale straler neemt een groot deel van het ondernet over. Dat het bovennet minder warmte levert, is ook het gevolg van de verminderde inzet van het ondernet.

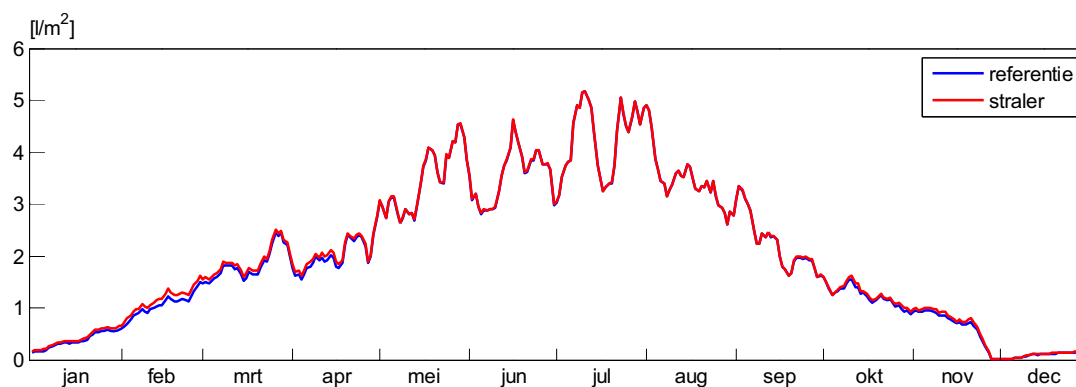
Bij de verwarming van het primaire net wordt de vrijkomende condensorwarmte in het bovennet gebracht. Bij een afname van het primaire net komt dan vanzelf minder condensorwarmte in het bovennet. Daarnaast hoeft het bovennet minder vaak bij te komen om aan de warmtevraag te voldoen. Het totale jaargebruik voor de referentie is berekend op $43,4 \text{ m}^3 \text{ m}^2$. Zelfs als wordt uitgegaan van een 100% opwekkingsrendement van de ideale straler, dan neemt het energiegebruik toe tot $45,3 \text{ m}^3 \text{ m}^2$.

Door het verlagen van de setpointtemperatuur neemt de kasluchttemperatuur ook daadwerkelijk af, zoals in Figuur 4.2 wordt getoond. Gelijktijdig blijft de gewastemperatuur gelijk, zodat gesteld kan worden dat de regelaar op de gewastemperatuur goed functioneert. Het verschil in gewastemperatuur is zo klein dat er geen onderscheid is tussen de referentie en de straler.



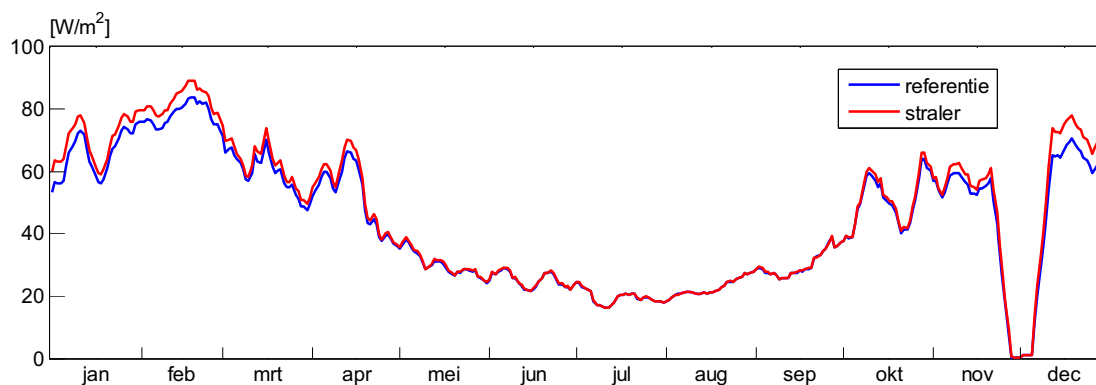
Figuur 4.2. De etmaalgemiddelde kaslucht- en gewastemperatuur voor de referentieteel van tomaat en de teelt met de ideale straler, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen. Opm. de lijn van de 'gewas straler' is niet zichtbaar is omdat die samenvalt met 'gewas referentie'.

Figuur 4.2 laat duidelijk zien dat er vooral in de wintermaanden grote verschillen zijn in de kasluchttemperatuur. In de zomer verdwijnen deze verschillen omdat de zon het gewas op temperatuur brengt. Hoewel de gewastemperatuur van deze twee situaties vrijwel gelijk is, blijkt er toch een klein verschil in de verdamping te ontstaan, zoals uit Figuur 4.3 blijkt. Door de koelere lucht neemt de gemiddelde dampconcentratie van de lucht af, waardoor het dampdruk verschil tussen blad en lucht iets gaat toenemen. Het verschil in verdamping blijft beperkt tot ruim 1%.

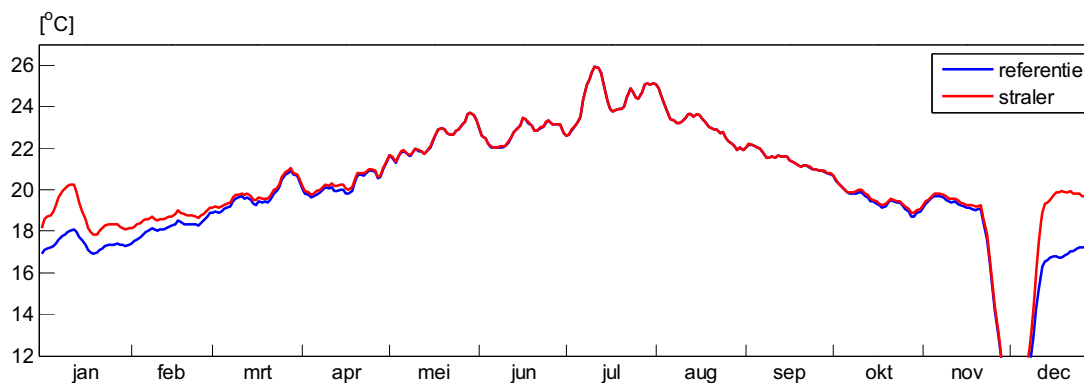


Figuur 4.3. De gesimuleerde dagelijkse verdampingssom voor de referentieteelt van tomaat en de teelt met de ideale straler, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

Zoals uit Figuur 4.1 al bleek, is het energiegebruik toegenomen bij de introductie van deze straler. Figuur 4.3 maakt duidelijk dat dit niet het gevolg van een sterke toename van de verdamping is. Vraag is dan ook waar de energie wel in is gaan zitten, en wanneer dit verschil tot stand komt. In Figuur 4.4 is de daggemiddelde energie-input van alle energiebronnen (zoals in Figuur 4.1 weergegeven) afgebeeld. Vanaf de teeltstart, begin december, tot eind februari, heeft de straler een duidelijk hoger, echter wel langzaam afnemend energiegebruik. Dit heeft veel te maken met de groei van het gewas. Hoewel er van een 'ideale' straler wordt uitgegaan, zal bij een klein gewas (lage LAI), een behoorlijk deel van de stralingsenergie niet in het gewas maar op de bodem terecht komen. Hierdoor zal in deze periode de bodemtemperatuur dan ook op gaan lopen, zoals uit Figuur 4.5 blijkt.



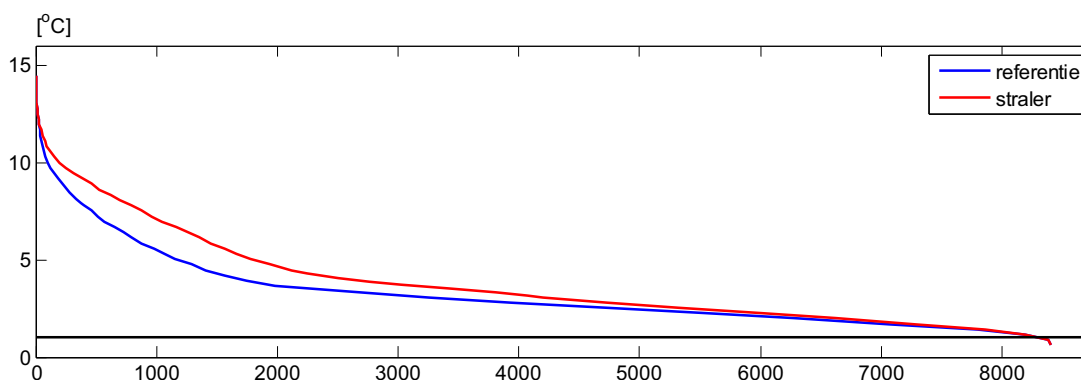
Figuur 4.4. De daggemiddelde energie-input van alle energiebronnen voor de referentieteelt van tomaat en de teelt met de ideale straler, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.



Figuur 4.5. De daggemiddelde bodemtemperatuur voor de referentieteelt van tomaat en de teelt met de ideale straler, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

Door de verlaging van de luchttemperatuur, bij gelijkblijvende gewastemperatuur, zal ook de kans op natslag worden beïnvloed. Om dit te tonen, is in Figuur 4.6 van zowel de referentieteelt als de ideale straler een jaarbelastingduurkromme gegeven van het temperatuurverschil tussen de planttemperatuur en de dauwpunttemperatuur van de kaslucht, waarbij de berekende verschillen zijn geordend van hoog naar laag. Daalt de gewastemperatuur onder de dauwpunttemperatuur van de kaslucht, dan zal het gewas natslaan. Omdat het model geen rekening houdt met variaties in temperatuur in het gewas zelf, houden we rekening met een potentieel gevaar voor natslag als de afstand tussen de berekende gewastemperatuur en het dauwpunt van het lucht minder dan 1 °C bedraagt (de zwarte horizontale lijn in Figuur 4.6). Hierbij zijn de gegevens tijdens de teeltwisseling buiten beschouwing gelaten, waardoor er berekende waarden zijn voor 8424 uur in plaats van 8760 uur (365 dagen x 24 uur).

Er is slechts een beperkt aantal uren (ca. 120 uur) met een potentieel gevaar oplevert voor natslag. Door de straler neemt de kans op natslag duidelijk af, echter het aantal uren met kleine temperatuurverschillen ligt voor beide cases op een vrijwel gelijk niveau. Uren dat het verschil in dauwpunttemperatuur zo klein is zijn ook vaak uren dat er weinig of niet gestookt wordt. Dan is het ook niet te verwachten dat door de inzet van een straler het aantal uren met potentieel gevaar afneemt.



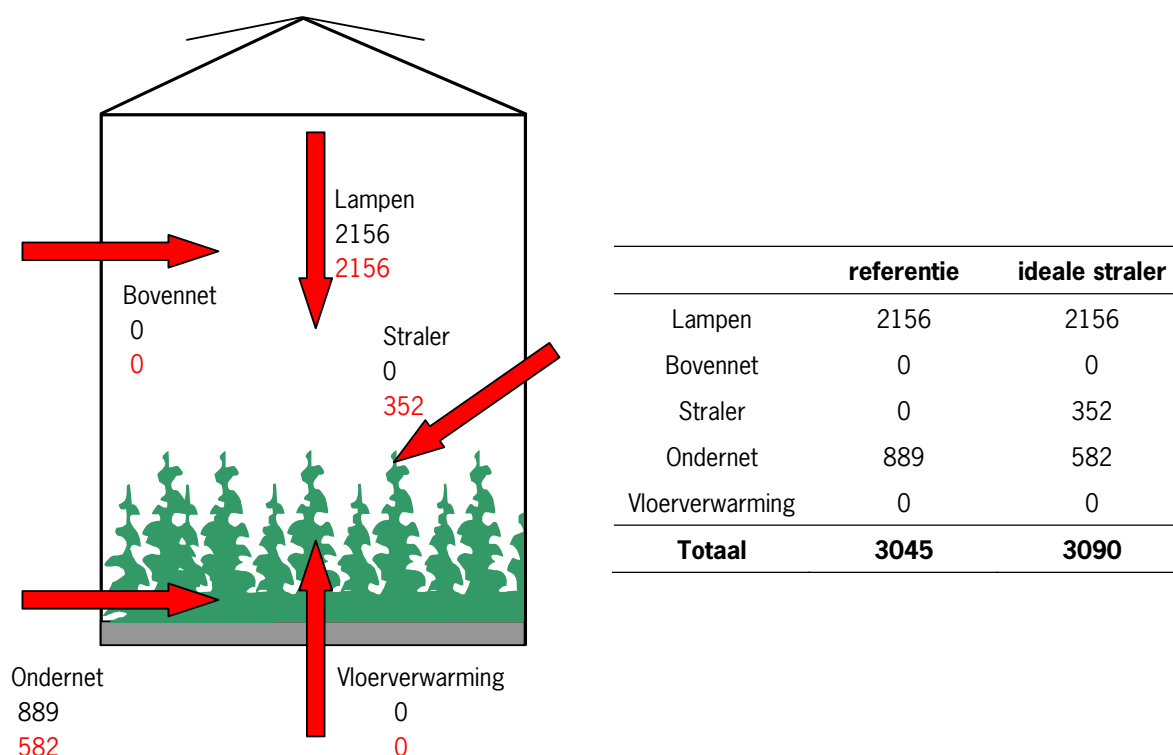
Figuur 4.6. Frequentie (uren) van het verschil tussen de gesimuleerde gewastemperatuur en dauwpunttemperatuur van de kaslucht voor de referentieteelt en de teelt met de ideale straler, voor tomaat.

4.1.2 Alternatieve verwarming roos

Inzet ideale straler

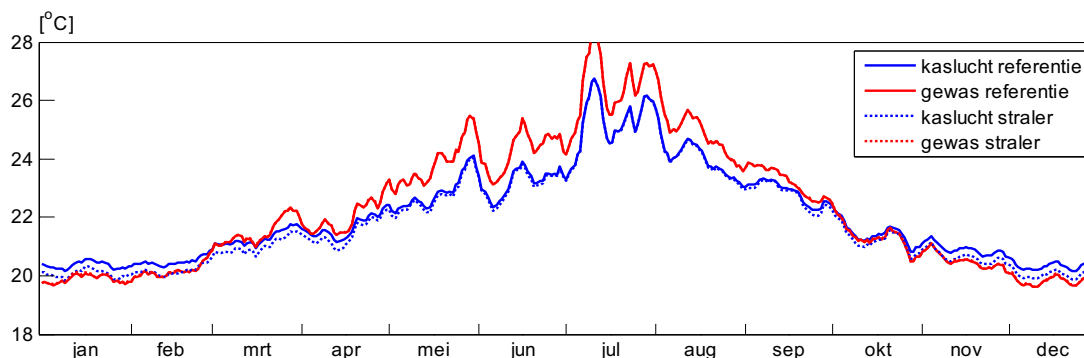
Door het veelvuldig inzetten van de assimilatiebelichting het type belichting (SON-T) wordt al een aanzienlijk deel van de elektrische input direct als warmtestraling in het gewas gebracht. In de berekeningen is dat 25%. In Figuur 4.7 is de energie-input van beide verwarmingssystemen, de lampen en de ideale straler weergegeven. De referentiegetallen zijn in het zwart en de berekeningsresultaten met de ideale straler in het rood weergegeven.

Het ondernet gaat een veel kleiner deel van de totale warmtebehoefte in de kas leveren. De ideale straler neemt een groot deel van het ondernet over. De elektriciteitsinput van de lampen verandert niet, omdat aan die regeling niets veranderd is. Wat wel veranderd is dat er bij ongewijzigde grootte en gebruik van de wk-installatie er een warmteoverschot ontstaat (de behoefte aan elektriciteit daalt niet). Vrijwel alle warmte die het ondernet in gaat is afkomstig van de wk-installatie, die in de referentieteeelt een zodanige omvang had gekregen dat er (vrijwel) geen warmte vernietigd hoeft te worden. Door de deze keuze moet er naast de 207 kWh m^{-2} die met de wk-installatie geleverd wordt ook nog eens 392 kWh m^{-2} worden ingekocht. Een straler geeft juist stralingswarmte door een hoge (honderden graden) temperatuur te bereiken. De (rest-) warmte van de wk-installatie heeft een te lage temperatuur om de straler van energie te voorzien. Met een mogelijk nuttig gebruik elders van het overschot is hier (maar ook in de referentie) geen rekening gehouden. Daardoor gaat een vermindering van de warmte-inbreng met de buisrail samen met een verhoging van vernietigde warmte. In dit geval neemt de vernietigde warmte toe van $2,9 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ in de referentiesituatie naar $9,8 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ bij inzet van de straler. Om dit vernietigingsverlies te beperken zal een kleinere wk-installatie ingezet moeten worden, waardoor er meer elektriciteit ingekocht moet gaan worden.



Figuur 4.7. Energiebronnen (gesimuleerd verbruik in MJ m^{-2}) voor een referentieteeelt van roos (zwarte getallen, boven) en met de ideale straler (rode getallen, onder).

Er zou gedacht kunnen worden dat de straler alleen ingezet zou moeten worden als de restwarmte opgebruikt is en de gewastemperatuur dan nog niet op peil is, maar voor het energiegebruik maakt het niet uit of het gewas verwarmd wordt via de lucht, of dat de lucht verwarmd wordt via het gewas.



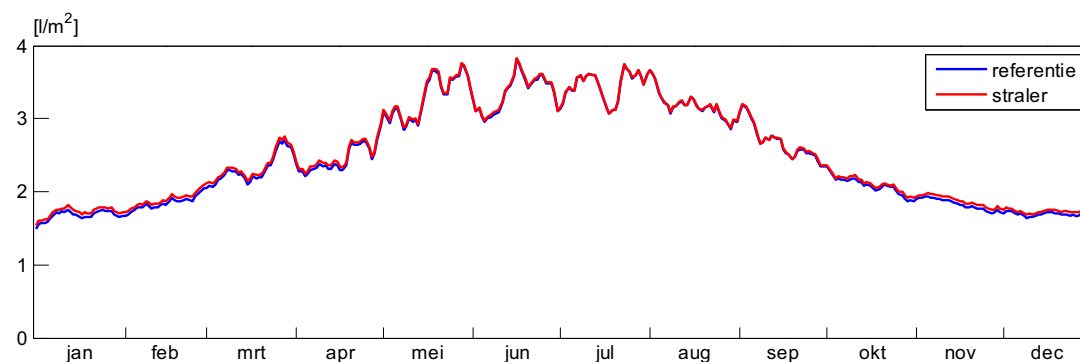
Figuur 4.8. De etmaalgemiddelde kaslucht- en gewastemperatuur voor de referentieteel van roos en de teelt met de ideale straler, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

Door het verlagen van de setpointtemperatuur neemt de kasluchttemperatuur ook daadwerkelijk af, zoals in Figuur 4.8 wordt getoond. Gelijktijdig blijft de gewastemperatuur gelijk, zodat gesteld kan worden dat de regelaar op de gewastemperatuur goed functioneert. Het verschil in gewastemperatuur tussen de referentie en de alternatieve verwarmings situatie dmv de ideale straler, dat er geen onderscheid is tussen de in de figuur weergegeven lijnen.

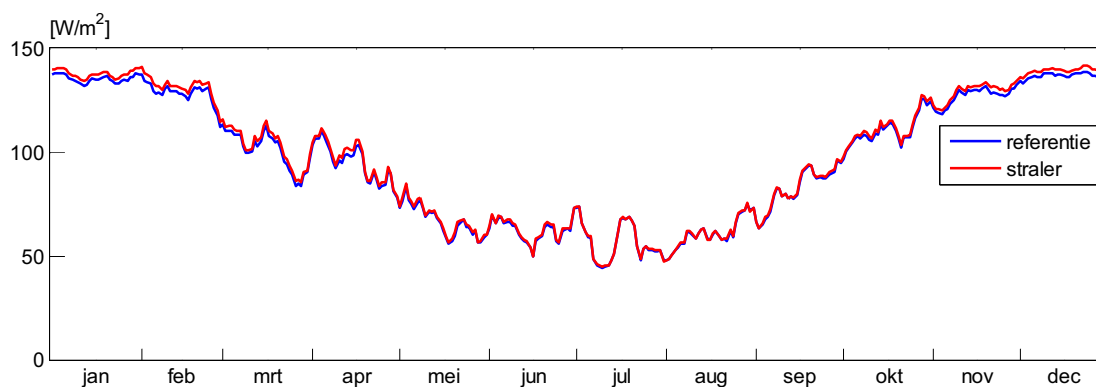
Figuur 4.8 laat duidelijk zien dat er alleen in de zomermaanden geen verschillen zijn in de kasluchttemperatuur. In de winter zijn er wel verschillen, echter deze zijn beduidend kleiner dan bij tomaat. De oorzaak is tweeledig. Roos is een gewas dat een meerjarige teelt kent. Hierdoor is er geen teeltwisseling en is een lage LAI als gevolg van de opstart van het gewas niet aanwezig. Het verlies naar de bodem is dan ook kleiner. Daarnaast is de bijdrage van de straler ten opzichte van de tomatenteelt veel kleiner omdat de lampen al voor een belangrijk deel voor de opwarming van het gewas zorgen. Hierdoor zal de kasluchttemperatuur minder ver kunnen wegzakken ten opzichte van de referentieteel dan in vergelijking met de tomatenteelt.

Hoewel de gewastemperatuur van de referentieteel en de situatie met de 'ideale' straler vrijwel gelijk is, blijkt er toch een klein verschil in de verdamping te ontstaan, zoals uit Figuur 4.9 blijkt. Het verschil in verdamping blijft beperkt tot ruim 1%.

Zoals uit Figuur 4.7 al bleek is het energiegebruik toegenomen bij de introductie van deze straler. Zoals uit Figuur 4.9 blijkt is dit niet het gevolg van een sterke toename van de verdamping. Vraag is dan ook waar het verschil wel door wordt veroorzaakt en wanneer dit verschil tot stand komt.

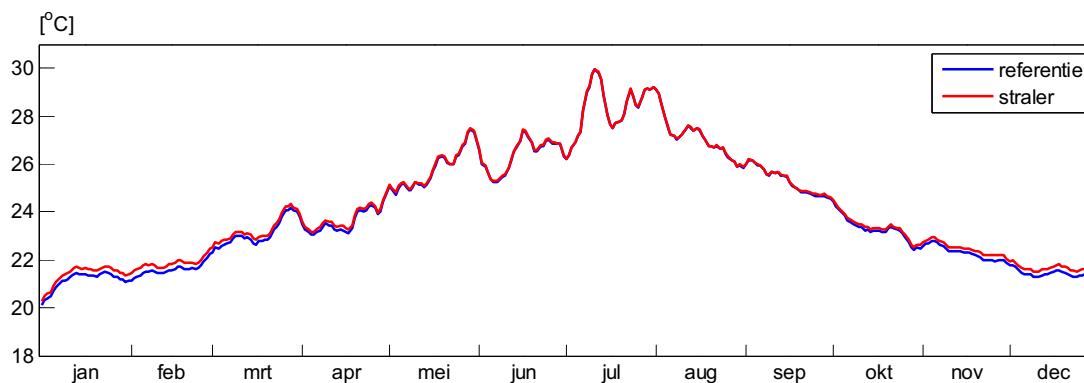


Figuur 4.9. De gesimuleerde dagelijkse verdampingssom voor de referentieteelt van roos en de teelt met de ideale straler, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

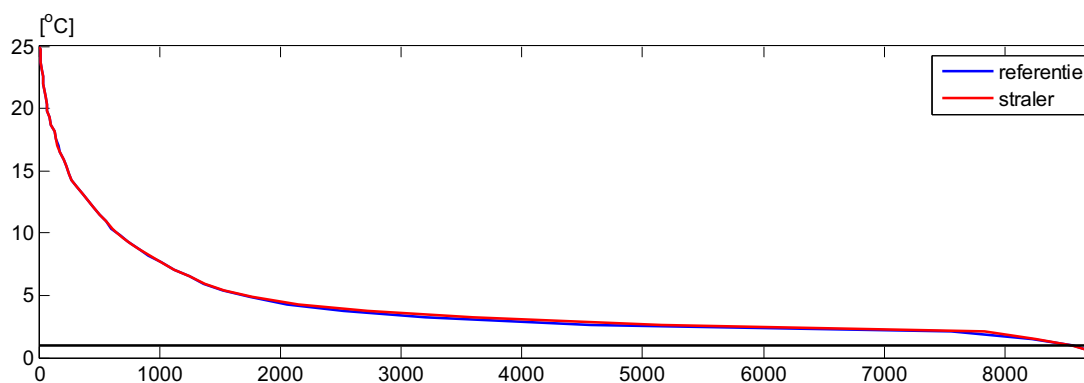


Figuur 4.10. De daggemiddelde energie-input van alle energiebronnen voor de referentieteelt van roos en de teelt met de ideale straler, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

In Figuur 4.10 is de daggemiddelde energie-input van alle energiebronnen zoals in Figuur 4.7 weergegeven afgebeeld. Vanaf medio oktober tot medio maart is er een duidelijk verschil tussen de referentie en de straler. Hoewel de roos niet zoals tomaat een teeltwisseling kent, daalt de LAI van de rozen teelt in de winter wel wat, maar in deze periode heeft de straler ook een groter aandeel in de verwarming. Er zal dan ook een deel van de stralingsenergie niet in het gewas maar toch op de bodem terechtkomen. Hierdoor zal in deze periode de bodemtemperatuur dan ook op gaan lopen, zoals uit Figuur 4.11 blijkt.



Figuur 4.11. De daggemiddelde bodemtemperatuur voor de referentieteelt van roos en de teelt met de ideale straler, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.



Figuur 4.12. Frequentie (uren) van het verschil tussen de gesimuleerde gewastemperatuur en dauwpunttemperatuur van de kaslucht voor de referentieteelt en de teelt met de ideale straler, voor roos.

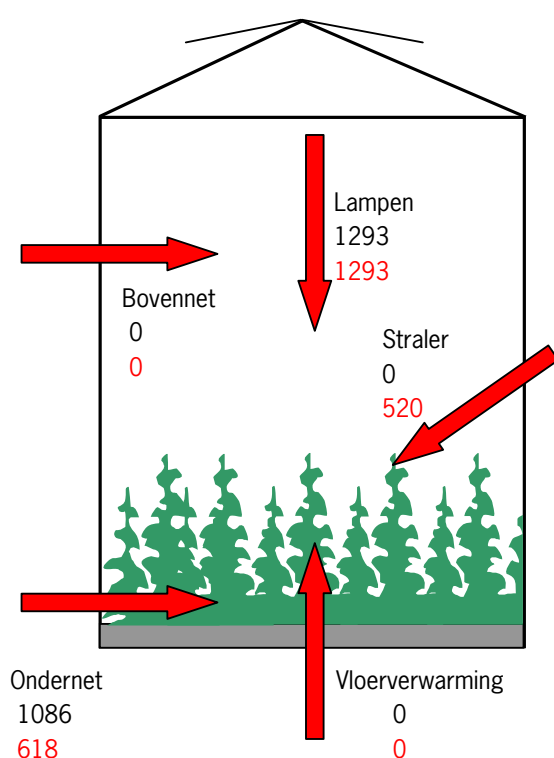
Door de verlaging van de luchttemperatuur (bij gelijkblijvende gewastemperatuur) zal ook de kans op natslag worden beïnvloed. Om dit te tonen, is in Figuur 4.12 van zowel de referentieteelt als de situatie met de 'ideale straler' een jaarbelastingduurkromme gegeven van het temperatuurverschil tussen de planttemperatuur en de dauwpunttemperatuur van de kaslucht, waarbij de berekende verschillen zijn geordend van hoog naar laag. Daalt de gewastemperatuur onder de dauwpunttemperatuur van de kaslucht, dan zal het gewas natslaan.

Er is slechts een beperkt aantal uren (ca. 200 uur) dat de afstand minder dan 1 °C bedraagt en een potentieel gevaar bestaat voor natslag. De zwarte horizontale lijn geeft de grens van 1 °C weer. Door de straler neemt de kans op natslag wel iets af, echter het aantal uren met kleine temperatuurverschillen ligt voor beide cases op een vrijwel gelijk niveau. Uren dat het verschil in dauwpunttemperatuur zo klein is, zijn ook vaak uren dat er weinig of niet gestookt wordt. Het grootste deel van de uren met een dauwpunttemperatuurverschil van kleiner dan 1 °C worden in de periode juli–augustus gerealiseerd. Dan is het ook niet te verwachten dat door de inzet van een straler het aantal uren met potentieel gevaar afneemt omdat er in deze periode slechts weinig wordt bijgestookt.

Inzet ideale straler en 'ideale verlichting'

Zoals uit Figuur 4.7 blijkt, hebben de lampen veruit het grootste aandeel in de energievoorziening, zo'n 70%. Dit is het geval voor de standaard SON-T lamp, waar een zeer groot deel van de elektrische input in NIR straling en voelbare warmte wordt omgezet in plaats van het benodigde PAR licht. Om inzicht te krijgen hoe het temperatuurverloop van het rozengekas eruit komt te zien als de SON-T lamp vervangen wordt door 'ideale belichting' is er voor deze belichte rozenteelt een (nog niet bestaande) 'perfecte lamp' geïntroduceerd die de elektrische input omzet in 50% PAR en 50% voelbare warmte (voor de SON-T lamp is dit 30% PAR, 45% voelbaar en 25% NIR). Omdat deze lamp dus meer PAR licht produceert maar er niet meer groei-licht gegeven hoeft te worden, wordt het elektrisch opgestelde lampvermogen met 3/5 verlaagd tot 69 W m². De overige instellingen blijven gelijk, dus wordt hier een referentie berekend waarbij op setpoint kastemperatuur is geregeld en de daarmee gerealiseerde gewastemperatuur als setpoint dient voor het inzetten van de 'ideale straler'.

Dat de energiestromen bij de toepassing van de hier beschreven 'perfecte lamp', sterk verandert ten opzichte van de toepassing met de SON-T lamp wordt duidelijk uit Figuur 4.13 waar de energiebronnen met de bijbehorende energiestroom voor de kas zijn gegeven.



	referentie	Perfecte lamp	Perfecte lamp + straler
Lampen	2156	1293	1293
Boven-net	0	0	0
Straler	0	0	520
Onder-net	889	1086	618
Vloerverwarming	0	0	0
Totaal	3045	2379	2431

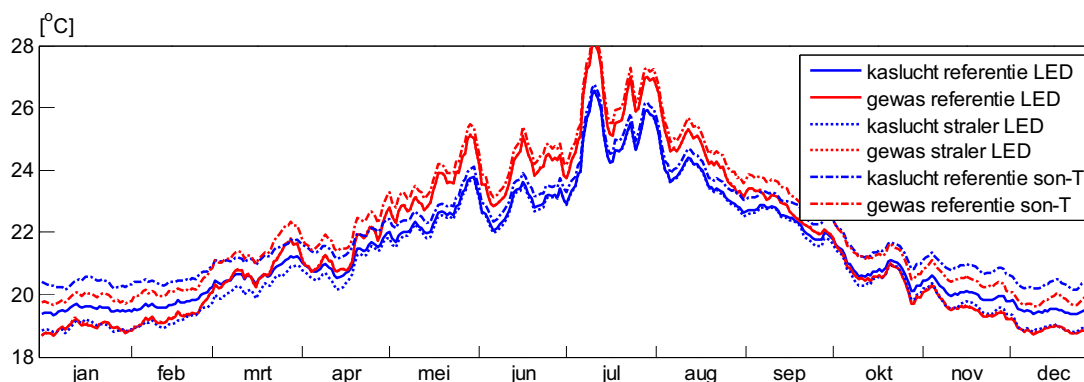
Figuur 4.13. Energiebronnen bij roos (gesimuleerd verbruik in MJ m⁻²) voor de referentieteeelt (zie Figuur 4.7), 'perfecte lamp' (zwarte getallen, boven) en 'perfecte lamp' + straler (rode getallen, onder) waarbij de lampen een hoge PAR efficiëntie hebben (zie tekst).

Ten opzichte van de SON-T lamp (Figuur 4.7) is er een grote verschuiving en algehele daling van de energie-input. Doordat de hoeveelheid PAR licht gelijk is gebleven (door een sterk verbeterd rendement), daalt de elektrische input met 60%. Daarvoor in de plaats moet er weer wel wat meer energie in de buisrail worden gestopt. De totale energie-input (referentie SON-T ten opzichte van de 'perfecte lamp') neemt af van 3045 tot 2379 MJ, een afname van 22%. De inzet van de straler laat de input van het onder-net wel dalen, echter netto moet er wel iets meer energie in

worden gebracht dan in de referentie. Door het regelen op gewastemperatuur bij het inzet van de straler, neemt de kasluchttemperatuur ook daadwerkelijk af zoals in Figuur 4.14 wordt getoond.

De gewastemperatuur blijft gelijk, zodat gesteld kan worden dat de regelaar op de gewastemperatuur, goed functioneert. Het verschil in gewastemperatuur is zo klein dat er geen onderscheid is tussen de in de figuur weergegeven lijnen. Om het vergelijk met de SON-T lamp te vereenvoudigen, zijn in Figuur 4.14 ook de kaslucht- en gewastemperatuur van de referentie met de SON-T uit Figuur 4.8 opgenomen.

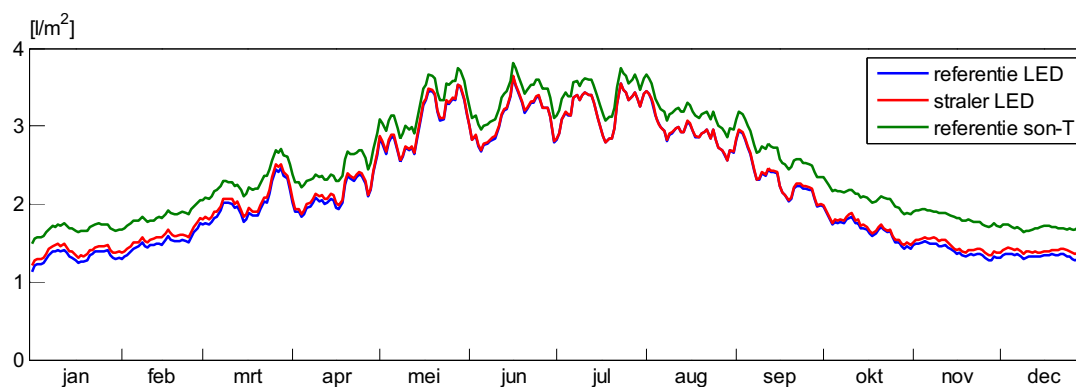
Uit Figuur 4.14 blijkt dat de gerealiseerde kasluchttemperatuur in de twee situaties niet dezelfde is, ondanks dat de setpoints gelijk zijn. Dit komt omdat door de lagere efficiëntie van de SON-T lampen men over meer restwarmte van de wk-installatie beschikt die de kas wordt ingepompt totdat de setpoint ventilatie is bereikt. Hierdoor neemt door de inzet van de 'perfecte lamp' de kaslucht- en de gewastemperatuur in de wintermaanden sterk af ten opzichte van het gebruik van de SON-T lamp; dit zou een iets lager productie als gevolg kunnen hebben. In de zomer is het verschil sterk teruggelopen, maar doordat er het gehele jaar belicht wordt, wordt het verschil nooit opgeheven. De kasluchttemperatuur neemt door de inzet van de straler in de wintermaanden met ca. 0,75 °C af t.o.v. de referentie met dezelfde type lampen.



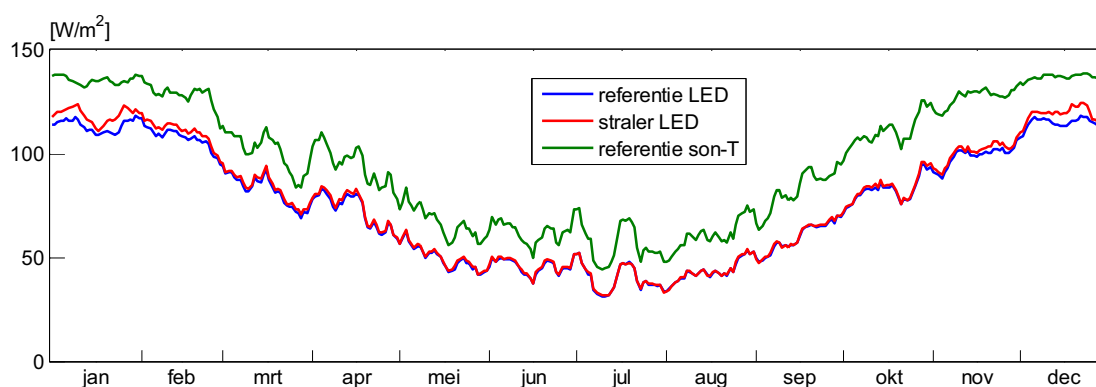
Figuur 4.14. De etmaalgemiddelde kaslucht- en gewastemperatuur voor de referentieteelt van roos en de teelt met de ideale straler (beiden met 'perfecte lampen', bijv. LED) en de referentieteelt met de SON-T lamp, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

De gewastemperatuur van deze 2 cases met een 'perfecte lamp' is gelijk, omdat daarop in het model 'geregeld' wordt en de gewasverdamping ook vrijwel dezelfde blijft (+1,5%). Dit is echter niet het geval ten opzichte van de referentie met de SON-T lamp: door de lagere gewastemperatuur verdampt de referentie 'perfecte lamp' 13% minder dan de referentie met de SON-T lamp (Figuur 4.15).

Zoals Figuur 4.13 al liet zien, is het energiegebruik iets toegenomen bij de introductie van de 'ideale straler' en dit is niet het gevolg van een sterke toename van de verdamping (tussen de 'perfecte lampen', Figuur 4.15). Vraag is dan ook waar het verschil wel door wordt veroorzaakt en wanneer dit verschil tot stand komt. In Figuur 4.16 is de daggemiddelde energie-input van alle energiebronnen uit Figuur 4.13 en de referentie met de SON-T weergegeven. De SON-T lamp vraagt het gehele jaar meer energie. De verwachte directe relatie met het aantal branduren per dag komt niet zo duidelijk naar voren als verwacht. In de winter zal dan ook een behoorlijk deel door het ondernet worden ingevuld, waar dit in de zomer veel geringer is.



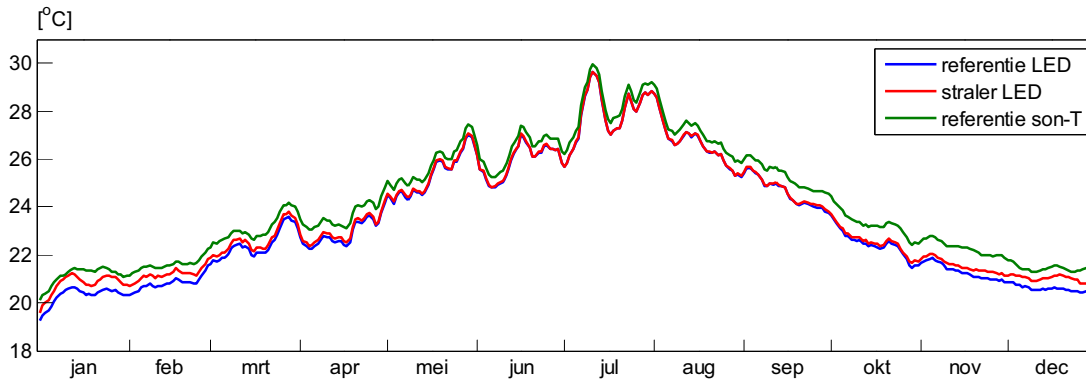
Figuur 4.15. De gesimuleerde dagelijkse verdampingssom voor de referentieteelt van roos en de teelt met de ideale straler beiden met 'perfecte lampen', bijv. LED) en de referentieteelt met de SON-T lamp, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.



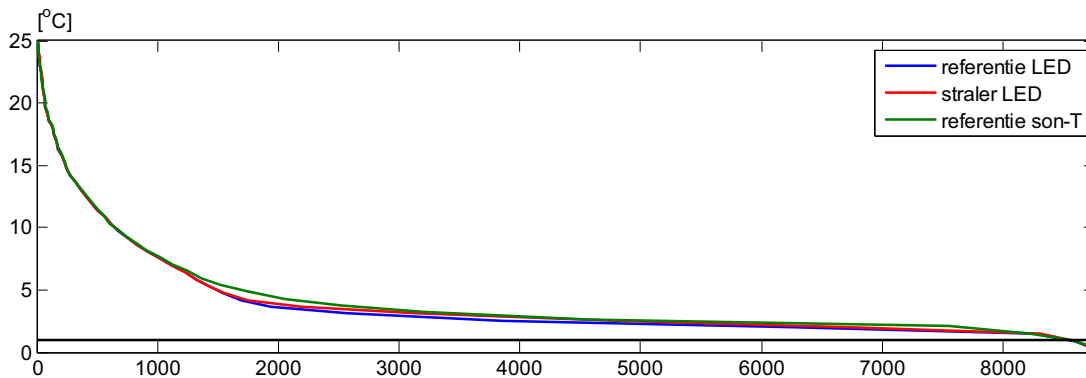
Figuur 4.16. De daggemiddelde energie-input van alle energiebronnen voor de referentieteelt van roos en de teelt met de ideale straler (beiden met 'perfecte lampen', bijv. LED) en de referentieteelt met de SON-T lamp, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

Vanaf medio november tot maart is er een duidelijk verschil tussen de referentie en de straler (beiden 'perfecte lamp'). Een deel van de stralingsenergie is niet in het gewas maar in de bodem terecht komen. Hierdoor zal in deze periode de bodemtemperatuur dan ook op gaan lopen, zoals uit Figuur 4.17 blijkt.

De bodemtemperatuur van de 'perfecte lamp' referentie is altijd een fors stuk lager dan de bodemtemperatuur bij het gebruik van een SON-T lamp (Figuur 4.17). Omdat de SON-T lamp altijd 25% van de energie in NIR-straling omzet (die naar het gewas toe wordt uitgestraald), zal een deel van deze straling ook op de bodem terecht komen. Dit veroorzaakt het verschil in de bodemtemperatuur die tot meer dan 1 °C kan oplopen als de beide referentietelten worden vergeleken.



Figuur 4.17. De daggemiddelde bodemtemperatuur voor de referentieteelt van roos en de teelt met de ideale straler (beiden met 'perfecte lampen', bijv. LED) en de referentieteelt met de SON-T lamp, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.



Figuur 4.18. Frequentie (uren) van het verschil tussen de gesimuleerde gewastemperatuur en dauwpunttemperatuur voor de referentieteelt en de teelt met de ideale straler (beiden met 'perfecte lampen', bijv. LED) en de referentieteelt met de SON-T lamp, voor roos.

Ook tussen de 'perfecte lamp' referentie en de 'perfecte lamp' met straler is er een behoorlijk verschil in bodemtemperatuur. Door de verlaging van de luchttemperatuur (bij gelijkblijvende gewastemperatuur), zal ook de kans op natslag worden beïnvloed. Om dit te tonen is in Figuur 4.18 van zowel de referentieteelt als in de situatie van de 'ideale straler' een jaarbelastingduurkromme gegeven van het temperatuurverschil tussen de planttemperatuur en de dauwpunttemperatuur van de kaslucht, waarbij de berekende verschillen zijn geordend van hoog naar laag. Daalt de gewastemperatuur onder de dauwpunttemperatuur van de kaslucht dan zal het gewas natslaan. Uit de figuur kan worden opgemaakt dat in het algemeen de 'perfecte lamp', als gevolg van de lagere gewastemperatuur (Figuur 4.18), een wat kleiner temperatuurverschil tussen het gewas en de dauwpunttemperatuur van de kaslucht heeft, en daarmee een iets groter gevaar op natslag heeft.

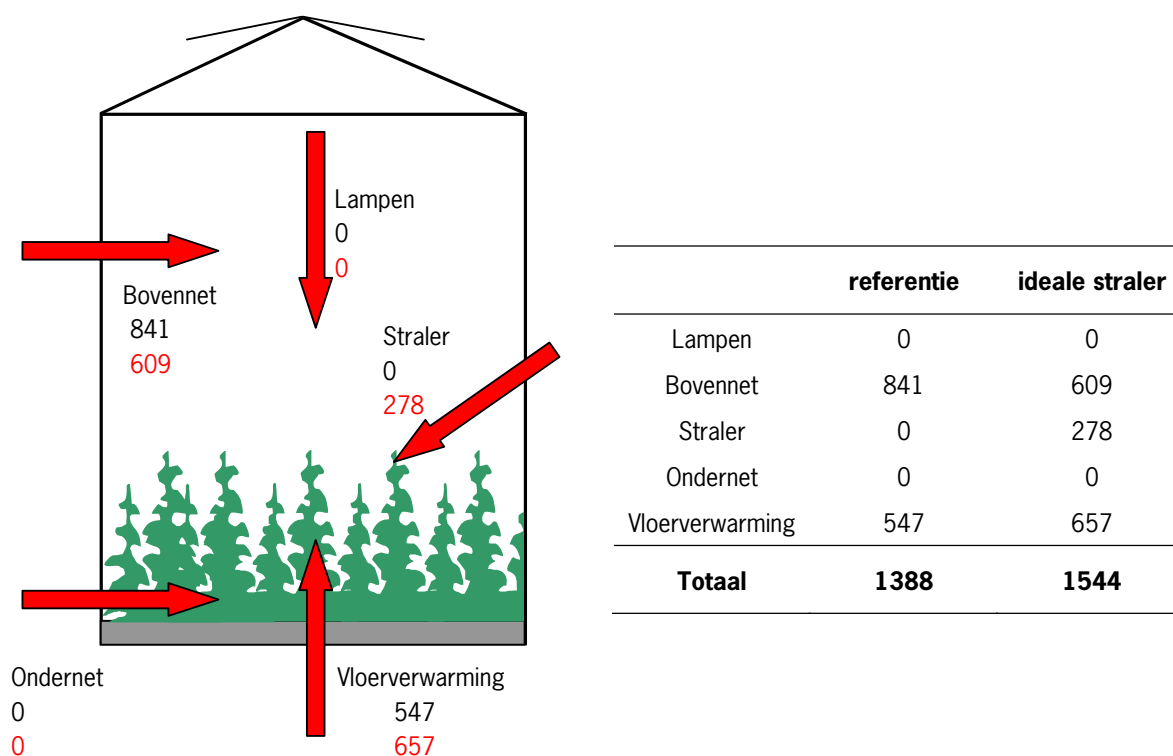
Er is slechts een beperkt aantal uren (ca. 200 uur) dat de afstand minder dan 1 °C bedraagt en een potentieel gevaar oplevert voor natslag. De zwarte lijn geeft de grens van 1 °C weer. Door de straler neemt de kans op natslag wel iets af, echter het aantal uren met kleine temperatuurverschillen ligt voor beide 'perfecte lamp' situaties op een vrijwel gelijk niveau.

4.1.3 Alternatieve verwarming Spathiphyllum

Inzet ideale straler

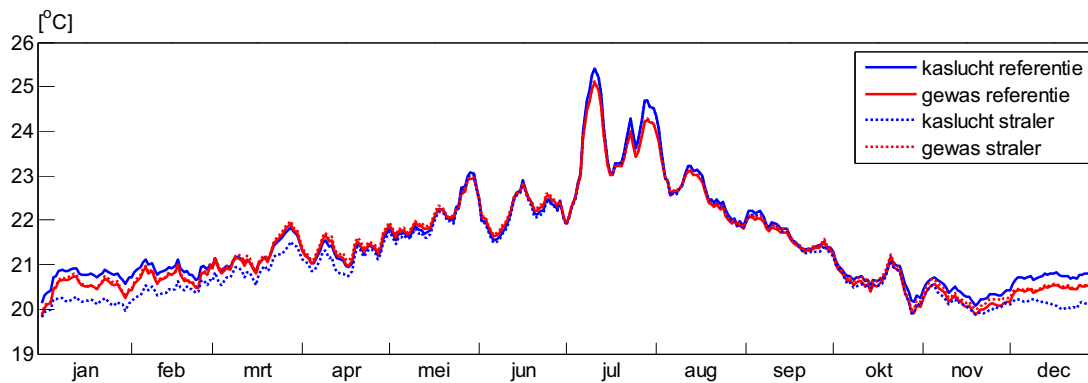
In de Spathiphyllum teelt wordt geen belichting ingezet. Wel is hier een primair verwarmingsnet die als betonvloer is uitgelegd. Er is een sterke watertemperatuur begrenzing van 30 °C om de pottemperatuur niet te ver op te laten lopen omdat een te hoge worteltemperatuur nadelige gevolgen heeft. In Figuur 4.19 is de energie-input van beide verwarmingssystemen (vloer en bovennet) en de ideale straler weergegeven. De referentiegetallen zijn in het zwart (boven) en de berekeningsresultaten met de ideale straler in het rood (onder) weergegeven.

Het bovennet gaat zo'n 30% minder warmte afgeven. Daar staat tegenover dat een deel wordt overgenomen door de vloerverwarming. Hoewel de temperaturen van de vloerverwarming nooit hoog mag oplopen geeft de vloerverwarming als gevolg van het grote verwarmde oppervlak een grote bijdrage aan de verwarming van de kaslucht. De vloer gaat in de situatie met de straler zelfs een grotere bijdrage aan de verwarming leveren dan het bovennet. De bijdrage van de straler aan de totale warmtevoorziening is ten opzichte van de andere gewassen en situaties het kleinst. Dit wordt veroorzaakt door de vloerverwarming die bijna 2 keer zoveel stralingswarmte aan het gewas geeft dan de straler.

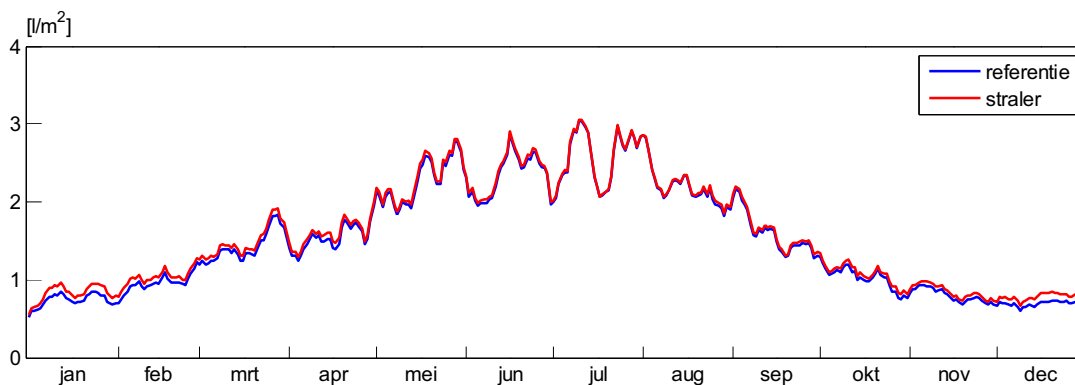


Figuur 4.19. Energiebronnen (gesimuleerd verbruik in MJ m⁻²) voor een referentieteeelt van *Spathiphyllum* (zwarte getallen, boven) en met de ideale straler (rode getallen, onder).

Door het verlagen van de setpointtemperatuur neemt de kasluchttemperatuur ook daadwerkelijk af zoals in Figuur 4.20 wordt getoond. Tegelijkertijd blijft de gewastemperatuur nagenoeg gelijk. Het verschil in gewastemperatuur is zo klein dat er geen onderscheid is tussen de in de figuur weergegeven lijnen van de referentiesituatie en de situatie met de ideale straler.



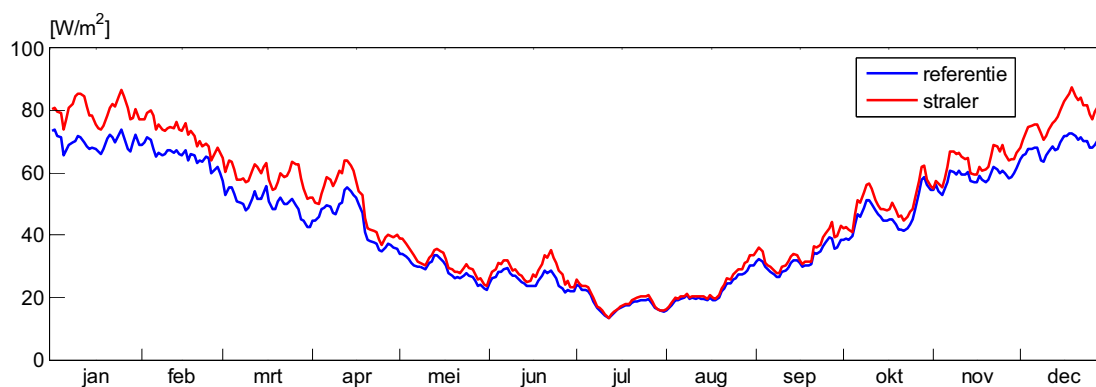
Figuur 4.20. De etmaalgemiddelde kaslucht- en gewastemperatuur voor de referentieteelt van *Spathiphyllum* en de teelt met de ideale straler, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.



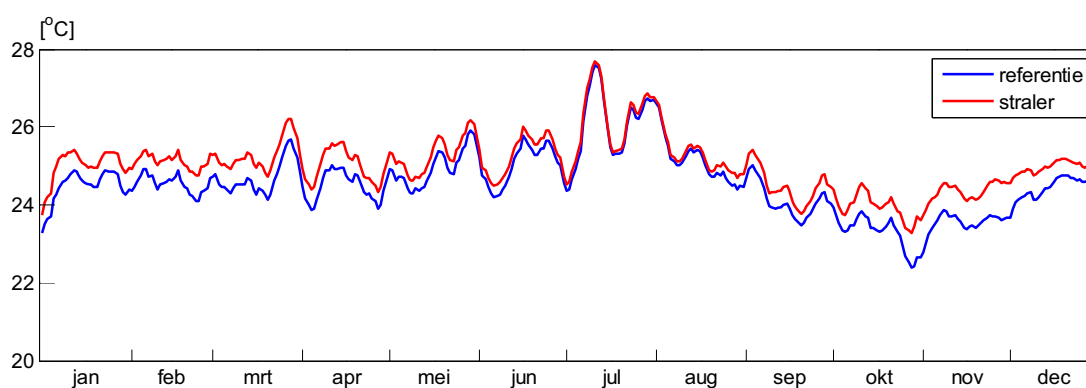
Figuur 4.21. De gesimuleerde dagelijkse verdampingssom voor de referentieteelt van *Spathiphyllum* en de teelt met de ideale straler, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

Figuur 4.20 laat zien dat er alleen in de zomermaanden geen verschillen zijn in de kasluchttemperatuur. In de wintermaanden zijn er wel verschillen die tot 1 °C temperatuurverschil van de kaslucht leiden. Ook in dit gewas is er geen teeltwisseling en kent de LAI van het gewas dan ook geen lage waarden, waarbij door de opzet op betonvloeren het gewas over het gehele vloeroppervlak is verdeeld. Dit in tegenstelling tot roos en tomaat waar nog looppaden zijn. Hoewel de gewastemperatuur in deze twee situaties vrijwel gelijk is, blijkt er toch een verschil in de verdamping te ontstaan, zoals uit Figuur 4.21 blijkt. Het verschil in verdamping loopt op tot ruim 3%.

Zoals uit Figuur 4.19 bleek is het energiegebruik toegenomen bij de introductie van deze straler. Figuur 4.22 laat zien wanneer in de tijd dit verschil tot stand komt. In deze figuur is de daggemiddelde energie-input van alle energiebronnen, zoals in Figuur 4.19 weergegeven. Vrijwel het gehele jaar wordt er in de situatie met de straler fors meer energie in de kas gestopt. De toegenomen verdamping (ca. 19 liter m^{-2}) die door het verwarmingssysteem wordt veroorzaakt, is een belangrijke oorzaak van deze toegenomen energie-input en neemt zo'n 46,5 MJ m^{-2} voor zijn rekening, 30% van het totaal toename.



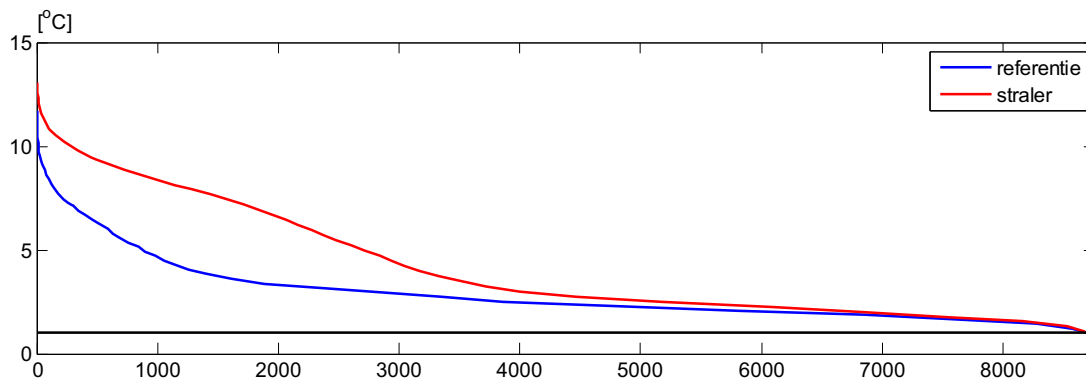
Figuur 4.22. De daggemiddelde energie-input van alle energiebronnen voor de referentieteelt van *Spathiphyllum* en de teelt met de ideale straler, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.



Figuur 4.23. De daggemiddelde bodemtemperatuur voor de referentieteelt van *Spathiphyllum* en de teelt met de ideale straler, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

Hoewel de planten netjes over de betonvloer verdeeld zijn, zal een deel van de stralingsenergie van de straler alsnog op de bodem terecht komen omdat het gewas niet alle straling kan onderscheppen. Dit zal de bodemtemperatuur beïnvloeden. In Figuur 4.23 wordt dit getoond. De in dit figuur getoonde temperatuur is de temperatuur van de bovenste centimeter van de vloer. De vloerverwarming brengt de warmte daaronder in en zal gemiddeld gesproken ook een hogere temperatuur hebben. De temperatuur van de toplaag van de vloer (bodem) zal beïnvloed worden door het kasklimaat en de klimaatomstandigheden. Van de straler ontvangt de bodem ca. 15% van de door de straler ingebrachte energie. Door de verlaging van de kasluchttemperatuur in de situatie dat de straler wordt ingezet, zal de bodem meer warmte gaan afgeven, welk verlies door de vloerverwarming zal worden gecompenseerd.

Door de verlaging van de luchttemperatuur en de gelijkblijvende gewastemperatuur, zal ook de kans op natslag, voor zover daar in deze teelt al sprake van zal zijn, worden beïnvloed. Om dit te tonen, is in Figuur 4.24 van zowel de referentieteelt als de ideale straler case, een jaarbelastingduurkromme gegeven van het temperatuurverschil tussen de planttemperatuur en de dauwpunttemperatuur van de kaslucht, waarbij de berekende verschillen zijn geordend van hoog naar laag. Daalt de gewastemperatuur onder de dauwpunttemperatuur van de kaslucht dan zal het gewas natslaan.



Figuur 4.24. Frequentie (uren) van het verschil tussen de gesimuleerde gewastemperatuur en dauwpunttemperatuur van de kaslucht voor de referentieteelt en de teelt met de ideale straler, voor Spathiphyllum.

Er is slechts een zeer beperkt aantal uren (ca. 50 uur) dat de afstand minder dan 1 °C bedraagt en een potentieel gevaar oplevert voor natslag. De zwarte horizontale lijn in Figuur 4.24 geeft de grens van 1 °C weer. Door de straler neemt de kans op natslag sterk af, echter het aantal uren met kleine temperatuurverschillen ligt voor beide cases op een vrijwel gelijk niveau. Uren dat het verschil in dauwpunttemperatuur zo klein is, zijn ook vaak uren dat er weinig of niet gestookt wordt.

4.2 Samenvatting en discussie alternatieve vormen van verwarming

Theoretisch gezien zou door een efficiëntere (deel-) verwarming van een kasgewas, zonder verliesposten naar de omgeving door isolatie van vloer, gevel en kasdek enorme hoeveelheden energie bespaard kunnen worden. Uit Dueck *et al.* (2004b) blijkt dat de verliezen voor de referentieteelten van tomaat 177 (bodem), 88 (gevel) en 3982 (dek) MJ m⁻² jaar⁻¹, van roos 221 (bodem), 112 (gevel) en 5038 (dek) MJ m⁻² jaar⁻¹ en van Spathiphyllum 138 (gevel) en 4245 (dek) MJ m⁻² jaar⁻¹ bedragen. De daadwerkelijke energiebehoefte voor de fotosynthese is slechts een fractie van de hoeveelheid die nu gebruikt wordt om de kas (-lucht) te verwarmen. Voor tomaat bedraagt deze 72 MJ m⁻² jaar⁻¹ en voor roos 113 MJ m⁻² jaar⁻¹ (Dueck *et al.*, 2004b).

In de praktijk blijkt dat het handhaven van een bepaalde temperatuur van onderdelen van een gewas, direct gepaard gaat met onvermijdelijke warmteverliezen, namelijk door warmteafgifte (convectie en straling) van het betreffende gewasdeel naar de koelere lucht eromheen. Dit geldt met name voor de grote oppervlaktes zoals de bladeren maar ook voor de grote eenheden van biomassa zoals de vruchten en bijv. ook de bloemknoppen.

Weer theoretisch bekeken zou de gewenste energiebesparing gehaald kunnen worden door deze verliezen te beperken door temperatuurverschillen met de omringende kaslucht te verkleinen. Convectieverliezen zouden dan beperkt kunnen worden door het verkleinen en isoleren van de ruimte die zich om de plantendelen bevindt en stralingsverliezen zouden beperkt kunnen worden door het verlagen van de gewastemperatuur naar een waarde dichtbij de omgevingstemperatuur.

Aan beide oplossingen kleven praktische bezwaren die een investering in deze richting niet als vanzelfsprekend maken. Naast de benodigde technologie en de arbeidsinzet om dit te realiseren, moet bij het verkleinen van de convectieruimte ook rekening gehouden worden met de lichtbeschikbaarheid en met de vochtregulering. Bij het verlagen van de gewastemperatuur moet niet de gewasontwikkeling verstoord worden, dus wortels, groeipunten en

vruchten moeten op een optimale temperatuur gehouden worden om geen inkomsten te derven door een verlies aan kwaliteit en/of kwantiteit.

De bladtemperatuur voor tomaat en *Spathiphyllum* die gerealiseerd wordt door het aanhouden van de setpoint-temperatuur, zou ten opzichte van de referentieteelten met 2 °C naar 18 °C kunnen zakken, waardoor een energiebesparing van ca. 13% (tomaat) en ca. 16% (*Spathiphyllum*) gerealiseerd zou kunnen worden (Dueck *et al.*, 2004a). In de referentiescenario's (Bijlage 1; Hoofdstuk 8.1) staat de setpointtemperatuur voor roos al op 18 °C, waardoor geen energiebesparing verwacht kan worden.

Er is door middel van simulaties een aantal scenario's doorgerekend dat vanuit de literatuur en de praktische mogelijkheden of ontwikkelrichting van belichting en gewasverwarming inzicht zou kunnen geven in mogelijke besparingen. Het is wel zo dat de beperkte mogelijkheden van huidige modellen met betrekking tot ruimtelijke verdeling van temperatuur het niet toe laten om nauwkeurig te voorspellen wat het energieverbruik zou zijn als slechts onderdelen van het gewas verwarmd worden, zoals bijvoorbeeld de wortels, groeipunten en/of de vruchten.

Het belangrijkste resultaat van deze reeks berekeningen is dat er met de huidige kasuitrusting en de inzet van 'perfecte lampen' en 'ideale stralers' er geen significante daling van het energieverbruik verwacht mag worden. Door met belichting zonder warmteoverschot ('perfecte lamp') en met gerichte straling ('ideale straler') het gewas te verwarmen geeft wel de gewenste verlaging van de kasluchttemperatuur, maar er moet dan meer energie gestoken worden in de alternatieve verwarmingsvorm ('ideale straler') om de gewas temperatuur op niveau te houden. Kanttekeningen hierbij zijn dat: 1) er op dit moment geen systeem voorhanden is dat zo'n gerichte energiebundel zou kunnen opleveren, en 2) onze kennis van groeiprocesen onvoldoende is om de gevolgen te voorspellen m.b.t. de uiteindelijke productie (kwaliteit en kwantiteit).

Bij gebrek aan deze kennis en mogelijkheden, is het aannemelijk dat tuinders de keuze zullen maken die hier is gepresenteerd, d.w.z. het handhaven van de huidige (ruimtelijk gemiddelde) gewas temperatuur. Ter illustratie: het is bekend dat 'een graadje minder in de kas' wel energiebesparing oplevert en toch wordt dat niet gedaan.

Het is wel onverwacht dat in alle doorgerekende situaties het inzetten van de 'ideale' straler resulteerde in een hoger totaal energieverbruik, omdat de luchttemperatuur namelijk wel afnam. De voornaamste reden is dat het gewas in feite een veel efficiëntere warmtewisselaar is dan een absorberend plat vlak (Figuur 3.1 en Figuur 3.2). Hierdoor moet veel energie gestoken worden om het gewas op temperatuur te houden.

Verder valt over het toegepaste extinctiemodel voor straling mogelijk te twisten, maar niet over het feit dat een gewas (en zeker een rijgewas) de bodem nooit voor 100% zal bedekken, waardoor een deel van de gestraalde energie verloren gaat omdat het niet onderschept kan worden. Het verlies zou door bodemisolatie beperkt kunnen worden. Bovendien moet niet vergeten worden dat hier met een onwaarschijnlijk efficiënte straler (geen warmte-productie en alle straling richting gewas) is gerekend, waar in de praktijk efficiëntieverliezen zullen optreden.

De wijze waarop een alternatieve verwarming van het gewas het mogelijk maakt om voor een lagere gemiddelde gewas temperatuur te kiezen, of vochtiger te telen, betekent dat er (veel) energie bespaard kan worden. Dit is al eerder aangetoond (cf. Stanghellini *et al.*, 2003; Stanghellini en Kempkes, 2004; Dueck *et al.*, 2004a; Dueck *et al.*, 2004b; Houter *et al.*, 2005). Kleine energieverliezen door de (geringe) toename van de gewasverdamping als gevolg van de toename in dampdrukverschil tussen het gewas en de kaslucht maken de kans op natslag uiteindelijk wel kleiner (hogere temperatuur van gewas), waardoor het 'vochtiger telen' minder gevaarlijk zou worden. Hier is gekozen om de vochtregeling onveranderd te laten, om de interactie van factoren te vermijden. Uit eerdere studies (Dueck *et al.*, 2004a; Dueck *et al.*, 2004b) bleek dat vochtiger telen (RV+5%) een energiebesparing kan opleveren van 6% bij tomaat, 14% bij roos en 5% bij *Spathiphyllum*. Dus van vochtiger telen is bekend dat het wel energiebesparing oplevert terwijl de meeste tuinders hier toch erg terughoudend mee omspringen.

Al met al is het wel mogelijk dat het door het aanpassen van de berekeningen op de hierboven geschetste punten een iets gunstiger beeld naar voren zou kunnen komen dan de berekeningen nu laten zien. Uiteindelijk blijkt dat de meest efficiënte wijze om een geheel gewas te verwarmen via de lucht is die het omringd, en de energiebesparing

gezocht zou moeten worden in het voorkomen dat deze lucht andere kaselementen onnodig gaat opwarmen (dit heet 'energieschermen'). De alternatieve verwarmingsbronnen en de efficiëntie daarvan moeten nog wel gerealiseerd worden (onze 'ideale straler' was uiteindelijk toch niet zo efficiënt). Tegelijkertijd moet er meer specifieke kennis beschikbaar komen over de gevolgen voor de gewasgroei en de gewasproductie, voordat ondernemers afzien van bewezen en beproefde regelstrategieën en klimaatsetpoints. Dit geldt ook voor het verwarmen van slechts delen van het gewas.

5 Conclusies

1. Uit de literatuur komt naar voren dat vooral het verwarmen van de wortels ter gedeeltelijke compensatie van een lagere luchttemperatuur, uitgebreid onderzocht is. Dit bleek niet succesvol (lagere groei en opbrengst), tenzij het gaat over bijv. potplanten op verwarmde tabletten en lage jonge planten, want dan wordt gelijktijdig met het wortelmilieu ook het bovengronds plantmilieu verwarmd.
2. Berekeningen in dit rapport laten zien dat er geen energiebesparing te behalen valt door specifiek gewasdelen te verwarmen waarbij de gemiddelde gewastemperatuur gehandhaafd blijft. In eerdere experimenten met selectieve verwarming van gewasdelen door andere temperatuurgradiënten en met luchtcirculatie werd ook geen energiebesparing bereikt (Campen en De Gelder, 2007). Het energiegebruik bleek zelfs toe te nemen.
3. Het specifiek verwarmen van delen van het gewas, waardoor een lagere gemiddelde gewastemperatuur kan ontstaan, zou wel kunnen leiden tot energiebesparing. Hoe daarmee de fysiologie, de groei en de ontwikkeling van het gewas worden beïnvloed is vooralsnog onbegrepen en kan niet vanuit de literatuur voorspeld of verklaard worden.
4. Een lagere gemiddelde gewastemperatuur en de daarbij behorende energiebesparing kunnen ook behaald worden door bij conventionele verwarming het temperatuursetpoint te verlagen. Er zijn een groot aantal modelstudies en experimenten die dit laatste ondersteunen (o.a. Dueck *et al.*, 2004a; Dueck *et al.*, 2004b). Een lagere setpointtemperatuur leidt echter vaak tot vertraging van de teelt.
5. Praktijkproeven om met selectieve verwarming van gewasdelen energiebesparing te bereiken lijken gezien het voorgaande niet zinvol en kent veel technische beperkingen. Dit is wellicht ook een belangrijke verklaring voor de geringe hoeveelheid literatuur omtrent specifiek verwarmen van bijvoorbeeld vruchten of groeipunten.
6. Kennis over de effecten van selectieve verwarming van gewasdelen op productie en kwaliteit is zeer beperkt. Praktijkproeven met selectieve verwarming van gewasdelen zijn noodzakelijk om meer inzicht te krijgen in de fysiologie, de groei en de ontwikkeling van het gewas. Op basis hiervan kan dan een inschatting gemaakt worden in welke mate gewasproductie en –kwaliteit gestuurd kan worden bij een lager energiegebruik.

6 Aanbevelingen

Uit de bevindingen in deze studie blijkt dat er in theoretisch zin een energiebesparing mogelijk lijkt door het verwarmen van gewasdelen, waarbij het mogelijk moet zijn om productiekwaliteit en productiekwantiteit te handhaven. Het blijft echter de vraag hoe een gewas daadwerkelijk zal reageren op deelverwarming. Ook blijkt dat de huidige kasuitrusting niet ingericht is op het realiseren van deelverwarming en dat innovaties en nieuwe technologieën nodig zijn om deelverwarming te realiseren.

Bij de ontwikkeling van 'perfecte lampen' en 'ideale stralers' zal aandacht moeten blijven bestaan voor de isolatie van de kas, omdat een gedeelte van de energie niet op het gewas valt en omdat het gewas als een erg goede warmte-wisselaar fungeert. De verliezen die hierdoor optreden zijn dan te beperken door het verkleinen van de convectie-ruimte (waarbij de vochthuishouding in het oog gehouden moet worden) en door het beperken van warmte-uitwisseling door uitstraling naar koudere omgevingsobjecten. Bij deze beperking van uitstraling zou rekening gehouden kunnen worden met een optimale temperatuur voor de ontwikkeling en functie van de wortels (20 °C), een verlaagde bladtemperatuur (18 °C) ten opzichte van huidige systemen en een handhaving van de groeipunttemperatuur op een gewenst niveau voor kwaliteit en kwantiteit van het product.

De specifieke aanbevelingen zijn:

- De uitvoering van experimenten naar de effecten van deelverwarming van gewasdelen voor verschillende kasgewassen
- Onderzoek naar optimale groeipunttemperatuur voor juiste afsplitsingsnelheden van bladeren en (bloem-) stengels
- Onderzoek naar technische mogelijkheden van efficiënte groeipuntverwarming zonder verlies van PAR

7 Referenties

- Abd el Rahman, A.T., J.F. Bierhuizen en P.J.C. Kuiper, 1959.
Growth and transpiration of tomato in relation to night temperature under controlled conditions. Mededelingen Landbouwhogeschool Wageningen 59, 1-6.
- Abdel-Mawgoud, A.M.R., Y.N. Sassine, U.A. El-Beairy, A.F. Abou-Hadid en S.O. El-Abd, 2005.
Effect of minimum root-zone temperature on the growth and production of greenhouse sweet pepper. J. Appl. Sci. Res. 1, 72-77.
- Abdelhafeez, A.T., H. Harssema, G. Veri en K. Verkerk, 1971.
Effects on soil and air temperatures on growth, development and water use of tomatoes. Neth. J. Agric. Sci. 19, 67-75.
- Adams, S.R. en V.M. Valdés, 2002.
The effect of periods of high temperature and manipulating fruit load on the pattern of tomato yields. J. Hort. Sci. Biotechn. 77, 461-466.
- Adams, S.R., K.E. Cockshull en C.R.J. Cave, 2001.
Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits. An. Bot. 88, 869-877.
- Ahn, S.J., Y.J. Im, G.C. Chung, B.H. Cho en S.R. Su, 1999.
Physiological response of grafted-cucumber leaves and rootstock roots affected by low root temperature. Sci. Hort. 81, 397-408.
- Baas, R. en M. Warmenhoven, 2003.
Planttemperatuur in relatie tot omgevingsfactoren: metingen voor mogelijke toepassing in klimaatregeling. Naaldwijk, Wageningen UR - PPO Glastuinbouw. Rapport 41600067, 28 pp.
- Baas, R., B. Eveleens, M. Warmenhoven en T. van der Wurff, 2002.
Bladtemperatuur in relatie tot de vochtvoorziening en klimaat bij chrysant, Impatiens, Spathiphyllum, Anthurium, gerbera en roos. Naaldwijk, Wageningen UR - PPO Glastuinbouw. Rapport 557, 36 pp.
- Bertin, N., 2005.
Analysis of the tomato fruit growth response to temperature and plant fruit load in relation to cell division, cell expansion and DNA endoreduplication. Ann. Bot. 95, 439-447.
- Bodner, M. en W. Larcher, 1987.
Chilling susceptibility of different organs and tissues of *Saintpaulia ionantha* and *Coffea arabica*. Angewandte-Botanik 61, 225-242.
- Boxall, M., 1971.
Some effects of soil warming on plant growth. Acta Hort. 22, 57-65.
- Breuer, J.J.G. en N.J. van de Braak, 1989.
Reference year for Dutch greenhouses. Acta Hort. 248, 101-108.
- Buwalda, F., 2003.
Grenswaarden voor temperatuurintegratie. Een definitiestudie. Naaldwijk, PPO Glastuinbouw. Rapport GT 12053 30 pp.
- Calvert, A., 1956.
The influence of soil and air temperatures on cropping of glasshouse tomatoes. J. Hort. Sci. 31, 69-75.
- Campen, J.B. en A. De Gelder, 2007.
Horizontale variatie. Wageningen, Plant Research International BV. Report 131, 16 pp.
- Carvalho, S.M.P., E. Heuvelink, R. Cascais en O. van Kooten, 2002.
Effect of day and night temperature on internode and stem length in chrysanthemum: Is everything explained by DIF? Ann. Bot. 90, 111-118.
- Challa, H. en P. Brouwer, 1985.
Growth of young cucumber plants under different diurnal temperature patterns. Acta Hort. 174, 211-218.
- Challa, H., J.C. Bakker, G.P.A. Bot, A.J. Udink ten Cate en J. van de Vooren, 1981.
Economical optimization of energy consumption in an early cucumber crop. Acta Hort. 118, 191-200.

- Cooper, A.J., 1973.
Root temperature and plant growth. Commonwealth bureau of horticulture and plantation crops. Research review 4, xx.
- Cuijpers, L.H.M. en J.V.M. Vogelesang, 1992.
DIF and temperature drop for short-day pot plants. Acta Hort. 327, 25-32.
- De Koning, A.N.M., 1989.
The effect of temperature on fruit growth and fruit load of tomato. Acta Hort. 248, 329-336.
- De Koning, A.N.M., 1994.
Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: a quantitative approach. Proefschrift Wageningen Agricultural University, Wageningen, 240 pp.
- Dieleman, J.A. en E. Heuvelink, 2005.
Gebruik van onderstammen bij vruchtgroenten. Inventarisatie van de mogelijkheden voor energiebesparing. Wageningen, Wageningen UR - Plant Research International. Nota 367, 36 pp.
- Dieleman, J.A. en E. Meinen, 2007.
Interacting effects of temperature integration and light intensity on growth and development of single-stemmed cut rose plants. Sci. Hort. 113, 182-187.
- Dieleman, J.A., F.W.A. Verstappen en D. Kuiper, 1998.
Root temperature effects on growth and bud break of *Rosa hybrida* in relation to cytokinin concentrations in xylem sap. Sci. Hort. 76, 183-192.
- Dieleman, J.A., E. Meinen en T.A. Dueck, 2005.
Effects of temperature integration on growth and development of roses. Acta Hort. 691, 51-58.
- Dijkshoorn-Dekker, M.W.C., 2002.
Crop quality control system: a tool to control the visual quality of pot plants. Proefschrift Wageningen University, Wageningen, 117 pp.
- Dueck, T.A., E. Meinen, J. Steenhuizen, D. Uenk en L.F.M. Marcelis, 2006.
Belichting tomaat: elk belichtingsuur volledig benutten. Wageningen, Plant Research International. Report xxx (in press), – pp.
- Dueck, T.A., A. Elings, F.L.K. Kempkes, P. Knies, N.J. van de Braak, N. Garcia, G. Heij, J. Janse, R. Kaarsemaker, P. Korsten, R. Maaswinkel, M. Ruijs, C. Reijnders en R. van der Meer, 2004a.
Energie in kengetallen: zoek naar een nieuwe balans. Wageningen, Plant Research International. Nota 313, 38 pp.
- Dueck, T.A., A. Elings, F.L.K. Kempkes, P. Knies, N.J. van de Braak, N. Garcia, G. Heij, J. Janse, R. Kaarsemaker, P. Korsten, R. Maaswinkel, F. van Noort, M. Ruijs, C. Reijnders en R. van der Meer, 2004b.
Energie in kengetallen: op zoek naar een nieuwe balans: basisdocument. Wageningen, Plant Research International. Nota 312, 150 pp.
- Erwin, J., P. Velguth en R. Heins, 1994.
Day/night temperature environment affects cell elongation but not division in *Lilium longiflorum* Thunb. J. Exp. Bot. 45, 1019-1025.
- Erwin, J.E., R.D. Heins en R. Moe, 1991.
Temperature and photoperiod effects on *Fuchsia* $\times$ *hybrida* morphology. J. Am. Soc. Hort. Sci. 116, 955-960.
- Faucher, M., J.L. Bonnemain en M. Doffin, 1982.
Effect of localized chilling on the phloem translocation of some species with or without P-protein and the influence of chilling method (in het Frans met Engelse samenvatting). Physiologie Vegetale 20, 395-405.
- Fröhlich, H., 1959.
Untersuchung über die wirkung einer Bodenheizung bei der frühen Haustomatkultur. Arch. Gartenb. 7, 547-554.
- Grusak, M.A., 1986.
Cold-inhibited phloem translocation in sugar beet. Proefschrift Univ. California, Davis, USA, xx pp.
- Grusak, M.A. en W.J. Lucas, 1984.
Recovery of cold-inhibited phloem translocation in sugar beet. I. Experimental analysis of an existing mathematical recovery model. J. Exp. Bot. 35, 389-402.

- Grusak, M.A. en W.J. Lucas, 1985.
Cold-inhibited phloem translocation in sugar beet. II. Characterization and localization of the slow-cooling response. J. Exp. Bot. 36, 745-755.
- Grusak, M.A. en W.J. Lucas, 1986.
Cold-inhibited phloem translocation in sugar beet. III. The involvement of the phloem pathway in source-sink partitioning. J. Exp. Bot. 37, 277-288.
- Grusak, M.A. en P.E.H. Minchin, 1989.
Cold-inhibited phloem translocation in sugarbeet. IV. Analysis of the cooling-induced repartitioning hypothesis. J. Exp. Bot. 40, 215-223.
- Hannah, M.A., M.J. Iqbal en F.E. Sanders, 2001.
Adaptation to long-term cold-girdling in genotypes of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). J. Exp. Bot. 52, 1123-1127.
- Harssema, H., 1977.
Root temperature and growth of young tomato plants. Proefschrift Landbouwhogeschool Wageningen, Wageningen, 86 pp.
- Heinsvig Kjaer, K., 2007.
Physiological responses of *Chrysanthemum x morifolium* to low night temperatures. Proefschrift University of Copenhagen, Copenhagen, xx pp.
- Heuvelink, E., 1989.
Influence of day and night temperature on the growth of young tomato plants. Sci. Hort. 38, 11-22.
- Heuvelink, E., 1995.
Effect of temperature on biomass allocation in tomato (*Lycopersicon esculentum*). Physiol. Plant. 94, 447-452.
- Heuvelink, E., 1999.
Evaluation of a dynamic simulation model for tomato crop growth and development. An. Bot. 83, 413-422.
- Ho, L.C., 1996.
Tomato. In: E. Zamki en A.A. Shaffer (Eds). Photoassimilate distribution in plant and crops. pp. 709-728.
- Houter, B., E.C. Rijpsma, J. Campen, A. de Gelder en F.L.K. Kempkes, 2005.
Planttemperatuur als stuurparameter in kasklimaatregelingen. Naaldwijk, Wageningen UR - PPO Glastuinbouw. Rapport 41616018, 85 pp.
- Jakupaj-de Snoo, E., 2006.
Kans scheuren tomaat blijft. In: Groenten en fruit 32, 19.
- Janse, J., 2003.
Minimale temperatuurgrenzen bij komkommer. Onderzoek 2001-2002. Naaldwijk, Wageningen UR - PPO Glastuinbouw. Rapport 13077, 19 pp.
- Janse, J. en M. Raaphorst, 2003.
Minimale temperatuurgrenzen courgette. Onderzoek 2002. Naaldwijk, Wageningen UR - PPO Glastuinbouw. Rapport 13058, 17 pp.
- Kaarsemaker, R. en H.-J. van Telgen, 2006.
Stuurmogelijkheden van bladoppervlak en nutriëntenopname tomaat in de gesloten kas met behulp van matverwarming. Naaldwijk, Wageningen UR - PPO Glastuinbouw. Rapport 3241709200, 41 pp.
- Kaczperski, M.P., W.H. Carlson en M.G. Karlsson, 1991.
Growth and development of *Petunia x hybrida* as a function of temperature and irradiance. J. Am. Soc. Hort. Sci. 116, 232-237.
- Kleinendorst, A. en B.W. Veen, 1983.
Responses of young cucumber plants to root and shoot temperatures. Neth. J. Agric. Sci. 31, 47-61.
- Köhl, J., P.H.B. de Visser en J. Wubben, 2007.
Risiko's op schimmelaantasting in vruchtgroenten: literatuurstudie : rapportage van project 'Risicoschatter voor schimmelaantasting in vruchtgroenten: voorfase' van onderzoeksprogramma energie (LNV-DK-03-06). Wageningen, Wageningen UR, Glastuinbouw. Nota 467, pp.
- Kresten Jensen, H.E., 1997.
Effects of photoperiod and temperature on morphogenesis in *Dianthus caryophyllus* 'Lillipot' stock plants. Acta Hort. 435, 77-86.

- Krug, H. en H.-P. Liebig, 1981.
Diurnal thermoperiodism of the cucumber. Acta Hort. 118, 83-94.
- Krug, H. en F. Thiel, 1985.
Effect of soil temperature on growth of cucumber in different air temperature and radiation regime. Acta Hort. 156, 117-126.
- Langton, F.A. en K.E. Cockshull, 1997a.
Is stem extension determined by DIF or by absolute day and night temperatures? Sci. Hort. 69, 229-237.
- Langton, F.A. en K.E. Cockshull, 1997b.
A re-appraisal of DIF extension growth responses. Acta Hort. 435, 57-64.
- Liebig, H.-P., 1985.
Model of cucumber growth and yield I. Raising the crop under low temperature regimes. Acta Hort. 156, 127-138.
- Maher, M.J., 1978.
The effect of root zone warming on tomatoes grown in nutrient solution at two air temperatures. Acta Hort. 82, 113-120.
- Maher, M.J., 1980.
Effect of root zone warming, flow rate and propagation system on tomato crop performance in NFT. Acta Hort. 98, 45-52.
- Malladi, A. en J.K. Burns, 2007.
Communication by plant growth regulators in roots and shoots of horticultural crops. Hort. Sci. 42, 1113-1117.
- Marcelis, L.F.M., 1993a.
Leaf formation in cucumber (*Cucumis sativus* L.) as influenced by fruit load, light and temperature. Gartenbauwissenschaft 58, 124-129.
- Marcelis, L.F.M., 1993b.
Fruit growth and biomass allocation to the fruits in cucumber. 1. Effect of fruit load and temperature. Sci. Hort. 54, 107-121.
- Marcelis, L.F.M., 1994.
Effect of fruit growth, temperature and irradiance on biomass allocation to the vegetative parts of cucumber. Neth. J. Agric. Sci. 42, 115-123.
- Marcelis, L.F.M. en L.R. Baan Hofman-Eijer, 1993.
Effect of temperature on the growth of individual cucumber fruits Physiologia Plantarum 87, 321-328.
- Moss, G.I., 1983.
Root-zone warming as a means to save energy in the production of greenhouse crops in Australia. Acta Hort. 31-38.
- Myster, J. en R. Moe, 1995.
Effect of diurnal temperature alternations on plant morphology in some greenhouse crops - a mini review. Scientia Horticulturae 62, 205-215.
- Nielsen, K.F., 1974.
Roots and root temperature. The Plant Root and its Environment Proceedings held at Virginia Polytechnic and State University 1971 (ed Carsen) pp 293-333
- Ploegman, C., 1964.
Betekenis van de watervoorziening, licht en bodemwarmte bij de teelt van tomaten. Mededelingen Directie Tuinbouw 27, 573-580.
- Shimizu, H. en R.D. Heins, 2002.
Prediction of plant shoot-tip temperature on a Penman-Monteith model. Acta Hort. 580, 169-176.
- Stanghellini, C., 1987.
Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management. Proefschrift Wageningen Universiteit, Wageningen, 150 pp.
- Stanghellini, C. en F.L.K. Kempkes, 2004.
Energiebesparing door verdampingsbeperking via klimaatregeling. Wageningen, Agrotechnology & Food Innovations. Rapport 309, 31 pp.

- Stanghellini, C., C. Blok, M.H. Esmeijer en F.L.K. Kempkes, 2003.
Strategieverkenning verdamping. Wageningen, Instituut voor Milieu- en Agritechniek (IMAG). Rapport P2003-2, 36 pp.
- Steingröver, E.G., J.W. Steenhuizen en J. van der Boon, 1993.
Effects of low light intensities at night on nitrate accumulation in lettuce grown on a recirculating nutrient solution. *Neth. J. Agric. Sci.* 41, 13-21.
- Van den Berg, G.A., 1987.
Influence of temperature on bud break, shoot growth, flower bud atrophy and winter production of glasshouse roses. Proefschrift Landbouwhogeschool, Wageningen, xx pp.
- Van der Boon, J. en J.W. Steenhuizen, 1986.
Het nitraatgehalte van sla op verwarmde voedingsoplossing. *Meststoffen* 2/3, 12-15.
- Van der Boon, J., J.W. Steenhuizen en E.G. Steingröver, 1990.
Growth and nitrate concentration of lettuce as affected by total nitrogen and chloride concentration, NH_4/NO_3 ratio and temperature of the recirculating nutrient solution. *J. Hort. Sci.* 65, 309-321.
- Van der Ploeg, A. en E. Heuvelink, 2005.
Influence of sub-optimal temperature on tomato growth and yield: a review. *J. Hort. Sci. Biotechn.* 80, 652-659.
- Van der Ploeg, A. en E. Heuvelink, 2006.
The influence of temperature on growth and development of chrysanthemum cultivars: a review. *J. Hort. Sci. Biotech.* 81, 174-182.
- Van Gorp, H.A.J.M., 1996.
Onderzoek paprika 1996. Horst, PBG Proeftuin Zuid-Nederland. Rapport / PBG Proeftuin Zuid-Nederland Z-2, xx pp.
- Venema, J.H., 2001.
Low-temperature tolerance of tomato and related wild *Lycopersicon* species. A comparative study on chloroplast functioning. Proefschrift Rijksuniversiteit Groningen, Groningen, 180 pp.
- Verkleij, F.N. en H. Challa, 1988.
Diurnal export and carbon economy in an expanding source leaf of cucumber at contrasting source and sink temperature. *Physiol. Plant* 74, 284-293.
- Vogelezang, J., 1990.
Effect of bench heating on crop responses. *Acta Hort.* 272, 133-136.
- Vogelezang, J., L. Cuijpers en M.T.h. de Graaf-van der Zande, 1992.
Growth regulation of bedding plants by reversed day/night temperature only? *Acta Hort.* 305, 37-44.
- Vogelezang, J.V.M., 1984.
Invloed van worteltemperatuur op de groei en ontwikkeling van planten -Literatuurstudie. Naaldwijk, Proefstation voor de Bloemisterij. Rapport 19, 23 pp.
- Vogelezang, J.V.M., 1988.
Effect of root-zone heating on pot plants. *Acta Hort.* 229, 421-427.
- Vogelezang, J.V.M., 1993.
Bench heating for potplant cultivation : analysis of effects of root- and air temperature on growth, development and production. Proefschrift Vogelezang, [S.l.], pp.
- Vogelezang, J.V.M., 1997.
The timing of low temperature treatments on stem elongation as affected by lighting strategies. *Acta Hort.* 435, 47-56.
- Vogelezang, J.V.M., 2000.
Improvement of plant quality by integrated control of light, temperature and DIF-strategy. *Acta Hort.* 515, 83-90.
- Vogelezang, J.V.M., J. de Hoog Jr en N. Marissen, 2000.
Effects of diurnal temperature strategies on carbohydrate content and flower quality of greenhouse roses. *Acta Hort.* 515, 111-118.
- Walker, A.J. en L.C. Ho, 1977.
Carbon translocation in the tomato: effects of fruit temperature on carbon metabolism and the rate of translocation. *Ann. Bot.* 41, 825-832.

Webb, J.A. en P.R. Gorham, 1965.

The effect of node temperature on assimilation and translocation of ^{14}C in the squash. *Can. J. Bot.* 43, 1009-1020.

Xiong, J., G.G. Patil en R. Moe, 2002.

Effect of DIF and end-of-day light quality on stem elongation in *Cucumis sativus*. *Scientia Horticulturae* 94, 219-229.

Zhang, Y., T.J. Jewett en J.L. Shipp, 2002.

A dynamic model to estimate in-canopy and leaf-surface microclimate of greenhouse cucumber crops. *Transactions of the ASAE* 45, 179-192.

8 Bijlagen

8.1 Referentieteelten en referentieverwarming

Voor het berekenen van de effecten van alternatieve verwarmingssystemen, is het simulatiemodel KASPRO gebruikt. Er is voor de drie gewasgroepen een representatief gewas gekozen: tomaat voor de vruchtgroenten, roos voor de snijbloemen en *Spathiphyllum* voor de potplanten, en voor elk van hen een door de praktijk geaccepteerde referentieteel bepaald. Als basis zijn hiervoor de gegevens uit het project 'Energie in kengetallen' gebruikt (Dueck *et al.*, 2004a; Dueck *et al.*, 2004b). Omdat deze gegevens al enkele jaren geleden zijn verzameld, zijn aanpassingen doorgevoerd om tot een reële uitgangssituatie te komen. Voor deze verkennende studie zijn de instellingen voor de klimaatregeling zo eenvoudig mogelijk gehouden om zo veel mogelijk een algemeen beeld te geven van de mogelijkheden.

Iedere teelt kent z'n eigen specifieke kasuitrusting en klimaatsetpoints (de zgn. 'standaardteelt' of 'referentieteelt'). Er is uitgegaan van een kas van 4 ha met een goothoogte van 5 m. De traliemaat is 8 m (2 kappen van 4 m) en de pootafstand is 4.5 m, met een 2-ruits luchting. Voor alle drie de gewasgroepen is dit als basis genomen. Het verwarmingssysteem is per teelt aan de specifieke eisen van het betreffende gewas aangepast. Voor de productie van warmte wordt bij tomaat en *Spathiphyllum* alleen gebruik gemaakt van een ketel, terwijl in de rozenteelt ook een warmtekrachtinstallatie wordt gebruikt. Aangenomen is dat er ten behoeve van CO₂-productie geen warmte wordt vernietigd. Voor de straling, buitentemperatuur en overige buitenklimaatfactoren wordt in de modelberekeningen gebruik gemaakt van het SEL-Jaar, dat representatieve klimaatgegevens voor Nederland bevat (Breuer en van de Braak, 1989).

8.1.1 Tomaat

Het verwarmingssysteem is een standaardstelsel voor de intensieve glasgroenteteelt en bestaat uit vijf 51 mm buizen per kap in het ondernet en half zoveel 28 mm buizen in het secundaire verwarmingsnet. De buizen van het secundaire verwarmingsnet fungeren als condensornet, maar ook als verwarmingsnet wanneer een groot verwarmingsvermogen noodzakelijk is. De buistemperaturen zijn begrensd op 70 °C voor zowel het onder- als het bovennet. Het secundaire net wordt pas ingeschakeld voor verwarming als het ondernet een buistemperatuur van 60 °C heeft bereikt. De kas is uitgerust met een rookgas-verdeelsysteem voor de CO₂-dosering, waarmee maximaal 180 kg CO₂ per ha per uur kan worden toegediend. De ketel heeft een verwarmingscapaciteit van 110 W m⁻² (125 m³ ha⁻¹ uur⁻¹) en er is een warmteopslag buffer met een waterinhoud van 120 m³ ha⁻¹. Indien de buffer vol is, wordt de CO₂-dosering gestopt. Het gewas wordt geplant op 8 december en geruimd op 25 november.

Kasklimaat

In onderstaande Tabel 8.1 zijn de temperatuursetpoints en de dagdelenindeling weergegeven. Er wordt met 1, 2 of 3 dagdelen gewerkt en er wordt een opstookhelling van 1 °C per uur gebruikt.

Tabel 8.1. Temperatuursetpoints en dagdelenindeling van de referentieteelt van tomaat.

datum	setpoint [°C]			start tijdstip dagdeel		
	dagdeel 1	dagdeel 2	dagdeel 3	dagdeel 1	dagdeel 2	dagdeel 3
8/12	20	18	–	zon op	1 uur na zon onder	–
15/01	20	16	17	5 uur na zon op	1 uur na zon onder	1 uur na zonop
01/11	18	–	–	dag en nacht	–	–
25/11	5	–	–	dag en nacht	–	–

Vanaf de teeltstart (8 december) staat de ventilatielijn 2 °C boven de stooklijn. Er wordt daardoor weinig warmte afgelucht, zodat op heldere dagen hogere etmaaltemperaturen kunnen worden behaald. Op 15 januari wordt de ventilatielijn teruggebracht tot 1,5 °C en vanaf 15 maart wordt dit nog verlaagd naar 1 °C, dat tot het eind van de teelt zo blijft gehandhaafd. De dode zone tussen verwarmen en luchten zijn dag en nacht gelijk. Er kan een lichtafhankelijke setpointverhoging op het setpoint verwarmen worden doorgevoerd om bij veel licht de warmte te benutten voor de gewasgroei. Dit houdt in dat tussen de 100 en 300 W m⁻² globale straling 1 °C (van de teeltstart tot 1 februari) of 2 °C (de rest van het jaar) lichtverhoging op de setpointtemperatuur verwarmen worden gezet.

Er wordt beperkt gebruik gemaakt van een 'minimum buistemperatuur'. In de periode vanaf de teeltstart tot 1 juni is de minimum buistemperatuur van 1,5 uur voor tot 2 uur na zonsopkomst ingesteld op 45 °C en de rest van de dag op 38 °C. Na 1 juni worden deze temperaturen met 3 °C verlaagd naar 42 °C en 35 °C. Tussen de 120 en 150 W m⁻² globale straling wordt de buistemperatuur afgebouwd.

De vochtregeling geschiedt met de luchtramen. Er wordt er pas bijgestookt indien de ruimtetemperatuur door deze ventilatie onder de setpointtemperatuur komt.

Vanaf de teeltstart tot 1 november wordt er ingegrepen op de luchtvochtigheid wanneer de kaslucht een vochtdeficit van minder dan 2,5 g m⁻³ heeft. Na deze periode is dit 1,5 g m⁻³. De regelactie is lineair: 10% raamopening per gram vochtdeficit per m³.

Het setpoint voor de CO₂-concentratie in de kas is jaarrond 1000 ppm. De CO₂ wordt gedoseerd met een maximale hoeveelheid van 180 kg ha⁻¹ uur⁻¹ tussen zonsopkomst en zonsondergang. De resterende ruimte in de buffer wordt over de rest van de CO₂-doseerperiode verdeeld. Er wordt in principe van zonsopkomst tot zonsondergang CO₂ gedoseerd. Tijdens de zomerdagen wordt er 2 uur later begonnen en 2 uur eerder gestopt met de dosering om de buffercapaciteit beter te benutten.

Er wordt een transparant beweegbaar scherm type SLS 10 ultra plus gebruikt tussen 15 oktober en 1 mei. Vanaf het eind van de oude teelt (10 november) tot 15 januari, wordt het scherm pas geopend bij een stralingsniveau boven de 100 W m⁻². Na deze periode wordt het scherm geopend bij een niveau van 50 W m⁻². Onder deze stralingsniveaus wordt het scherm weer gesloten. Als tweede voorwaarde voor het sluiten van de schermen is er de buitentemperatuur. Vanaf 10 november gaat het scherm pas dicht bij een buitentemperatuur lager dan 10 °C. Vanaf 15 januari bij een buitentemperatuur lager dan 8 °C, vanaf 15 februari < 6 °C, vanaf 5 maart < 5 °C en na 1 mei wordt het scherm tot 15 oktober uitgeschakeld. Vanaf 15 oktober mag het scherm pas weer dicht bij een buitentemperatuur van lager dan 7 °C.

Wanneer het vochtdeficit onder het setpoint komt wordt het scherm op een vochtier van maximaal 3% getrokken. In de gevel is een beweegbaar gevelscherm geplaatst, dat gelijktijdig met het horizontale scherm geopend en gesloten wordt.

Er wordt in de standaardteelt geen temperatuurintegratie toegepast. Verder wordt er ook geen gebruik gemaakt van 'minimum raamstanden'.

8.1.2 Roos

De rozenteelt wordt gekenmerkt door het intensieve gebruik van assimilatiebelichting. Omdat de lampen al erg veel warmte afgeven, wordt er in de referentieteelt nog slechts 1 verwarmingsnet van vijf 51 mm buizen per kap als ondernet toegepast. De buistemperatuur is begrensd op 65 °C. De belichting heeft een sterkte van 12000 lux, dat neerkomt op een opgenomen elektrisch vermogen van ca. 115 W m⁻². Indien al deze elektriciteit met een eigen warmtekrachtinstallatie zou worden opgewekt, zou er een groot warmteoverschot ontstaan. Daarom is er voor gekozen om een deel van de elektriciteit zelf te produceren (40 W_{el} m⁻²) en de rest in te kopen. Hiermee blijft het warmteoverschot enigszins binnen de perken. De lampen zijn dagelijks tussen 20:00 u en middernacht uitgeschakeld. In de periode van 1 september tot 15 april worden ze pas uitgeschakeld als de globale straling een niveau bereikt van 200 W m⁻². Buiten deze periode (in de zomer) is dit 40 W m⁻². In de winter gaan de lampen niet meer aan als de stralingssom een niveau van 1500 J cm⁻² heeft bereikt, in de zomer is dit al bij 10 J cm⁻² het geval. De kas is uitgerust met een rookgas-verdeelsysteem voor de CO₂-dosering. De warmtekrachtinstallatie voorziet de kas van CO₂. Gezien het vermogen van deze installatie kan hiermee maximaal 190 kg CO₂ per ha per uur worden toegediend. De ketel heeft een verwarmingscapaciteit van 110 W m⁻² (125 m³ ha⁻¹ uur⁻¹) en er is een warmteopslagbuffer met een waterinhoud van 200 m³ ha⁻¹. Indien de buffer vol is, wordt de CO₂-dosering gestopt.

Kasklimaat

In Tabel 8.2 zijn de temperatuursetpoints en de dagdelenindeling weergegeven. Er wordt met 2 dagdelen gewerkt en een opstookhelling van 1 °C per uur gebruikt.

Tabel 8.2. Temperatuursetpoints en dagdelenindeling voor een referentieteelt van roos.

datum	setpoint [°C]		start tijdstip dagdeel	
	dagdeel 1	dagdeel 2	dagdeel 1	dagdeel 2
jaarrond	18	20	19:00	0:00

De ventilatielijin staat het gehele jaar 1 °C boven de stooklijn. Er wordt daardoor weinig warmte afgelucht, zodat op heldere dagen hogere etmaaltemperaturen kunnen worden gehaald. In de zomerperiode is dit slechts 1 °C. Deze temperaturen zijn dag en nacht gelijk. Afhankelijk van de globale straling wordt tussen de 100 en 300 W m⁻² de setpointtemperatuur verwarmen met 2 °C verhoogd.

Er wordt jaarrond gebruik gemaakt van een 'minimum buistemperatuur'. Tussen 17:00u en 22:30u is de minimum-buis uit (20 °C), tussen 22:30 u en 0:00 u is deze 30 °C en om middernacht wordt deze verhoogd naar 38 °C. Om 15:00u wordt de minimumbuis temperatuur verlaagd naar 30 °C. Tussen de 200 en 300 W m⁻² globale straling wordt de buistemperatuur afgebouwd.

De vochtregeling geschiedt met de luchtramen. Er wordt pas bijgestookt indien de ruimtetemperatuur door deze ventilatie onder de setpointtemperatuur verwarmen komt. Er wordt ingegrepen op de luchtvochtigheid wanneer de kaslucht een vochtdeficit van minder dan 2.5 g m⁻³ heeft. De regelactie is lineair: 10% raamopening per gram vochtdeficit per m³.

Het setpoint voor de CO₂-concentratie in de kas is jaarrond 1000 ppm. De CO₂ wordt gedoseerd met een maximale hoeveelheid van 190 kg ha⁻¹ uur⁻¹ tussen zonsopkomst en zonsondergang en als de belichting aan is. De resterende ruimte in de buffer wordt over de rest van de CO₂-doseerperiode verdeeld.

Er wordt een transparant beweegbaar scherm type SLS 10 ultra plus gebruikt. Het scherm wordt geopend bij een stralingsniveau van boven de 5 W m⁻². Komt de straling onder dit niveau dan wordt het scherm weer gesloten. Als

tweede voorwaarde is er de buitentemperatuur. Het scherm gaat dicht bij een buitentemperatuur lager dan 7 °C. Wanneer het vochtdeficit onder het setpoint komt wordt het scherm op een vochtier van maximaal 4% getrokken. In de gevel is een beweegbaar gevelscherm geplaatst, dat gelijktijdig met het horizontale scherm geopend en gesloten wordt. Het scherm kan ook op een kier komen te staan als de kasluchttemperatuur meer dan 1,5 °C boven de setpointtemperatuur voor het verwarmen komt te liggen.

Er wordt in de standaardteelt geen temperatuurintegratie toegepast. Verder wordt er ook geen gebruik gemaakt van 'minimum raamstanden'.

8.1.3 Spathiphyllum

Bij de teelt van Spathiphyllum wordt slechts beperkt gebruik gemaakt van assimilatiebelichting. Bedrijven die belichting gebruiken, passen het dan meestal ook nog op een beperkt deel (opkweek) van het bedrijf toe. Er zal dan ook geen assimilatiebelichting in de referentieteelt wordt toegepast. Bij deze teelt wordt gebruik gemaakt van een verwarmde betonvloer. Daarnaast is er nog één verwarmingsnet van drie 51 mm buizen per kap als bovennet. De buistemperatuur is begrensd op 85 °C. De kas is uitgerust met een rookgas-verdeelsysteem voor de CO₂-dosering. De ketel voorziet de kas van CO₂. Gezien het vermogen van deze installatie kan hiermee maximaal 180 kg CO₂ ha⁻¹ uur⁻¹ worden toegediend. De ketel heeft een verwarmingscapaciteit van 110 W m⁻² (125 m³ ha⁻¹ uur⁻¹) en er is een warmteopslag buffer met een waterinhoud van 150 m³ ha⁻¹. Indien de buffer vol is, wordt de CO₂-dosering gestopt.

Kasklimaat

In Tabel 8.3 zijn de temperatuursetpoints en de dagdelenindeling weergegeven. Er wordt met 2 dagdelen gewerkt en een opstookhelling van 1 °C per uur gebruikt. De ventilatielijn staat van 15 oktober tot 15 april 2 °C boven de stooklijn. Er wordt daardoor weinig warmte afgelucht, zodat op heldere dagen hogere etmaaltemperaturen kunnen worden behaald. In de zomerperiode is dit slechts 1 °C. Deze temperaturen zijn dag en nacht gelijk. Lichtafhankelijk wordt bij een globale straling tussen de 100 en 200 W m⁻² de setpointtemperatuur verwarmen met 1,5 °C verhoogd.

Er wordt jaarrond (dag en nacht) gebruik gemaakt van een 'minimum buistemperatuur' van 30 °C. Tussen de 100 en 150 W m⁻² globale straling wordt de buistemperatuur afgebouwd. De vochtregeling geschiedt met de luchtramen. Er wordt pas bijgestookt als de ruimtetemperatuur door deze ventilatie onder de setpointtemperatuur voor het verwarmen komt. Er wordt ingegrepen op de luchtvochtigheid wanneer de kaslucht een vochtdeficit van minder dan 2 g m⁻³ heeft. De regelactie is lineair: 10% raamopening per gram vochtdeficit per m³.

Tabel 8.3. Temperatuursetpoints en dagdelenindeling van de referentieteelt van Spathiphyllum.

datum	setpoint [°C]		start tijdstip dagdeel	
	dagdeel 1	dagdeel 2	dagdeel 1	dagdeel 2
01/12	20	21	zon op	zon onder
01/03	20	20	zon op	zon onder
01/06	20	19	zon op	zon onder
01/09	20	20	zon op	zon onder

Het setpoint voor de CO₂-concentratie in de kas is jaarrond 1000 ppm. De CO₂ wordt gedoseerd met een maximale hoeveelheid van 180 kg ha⁻¹ uur⁻¹ tussen zonsopkomst en zonsondergang en als de belichting aan is. De resterende ruimte in de buffer wordt over de rest van de CO₂-doseerperiode verdeeld.

Er worden meerdere schermen gebruikt. Het eerste scherm is een transparant beweegbaar scherm type SLS 10 ultra plus. Het scherm wordt afhankelijk van de buitentemperatuur en globale straling geopend volgens Tabel 8.4. Komt de straling onder dit niveau dan wordt het scherm gesloten.

Tabel 8.4 Combinatie van buitentemperatuur en globale straling waarbij het eerste scherm gesloten wordt in de referentieteelt van Spathiphyllum.

Buitentemperatuur [°C]	Globale straling [W m ⁻²]
-15	500
-4	220
8	60
10	10
50	1

Het tweede scherm is een zonweringscherm (XLS15 F) dat in de nacht gesloten wordt als de buitentemperatuur onder de 8 °C komt. Dit scherm wordt gesloten als de globale straling boven de 300 W m⁻² komt.

Wanneer het vochtdeficit onder het setpoint komt wordt het scherm op een vochtlier van maximaal 3% getrokken. In de gevel is een beweegbaar gevelscherm geplaatst, dat gelijktijdig met het horizontale scherm geopend en gesloten wordt. Het scherm kan ook op een kier komen te staan als de kasluchttemperatuur meer dan 3 °C boven de setpointtemperatuur voor het verwarmen komt. Omdat Spathiphyllum gevoelig is voor teveel licht wordt de kas in de periode van 15 april tot 1 oktober gekrijt met een factor 50% (de helft van het licht wordt weggefilterd).

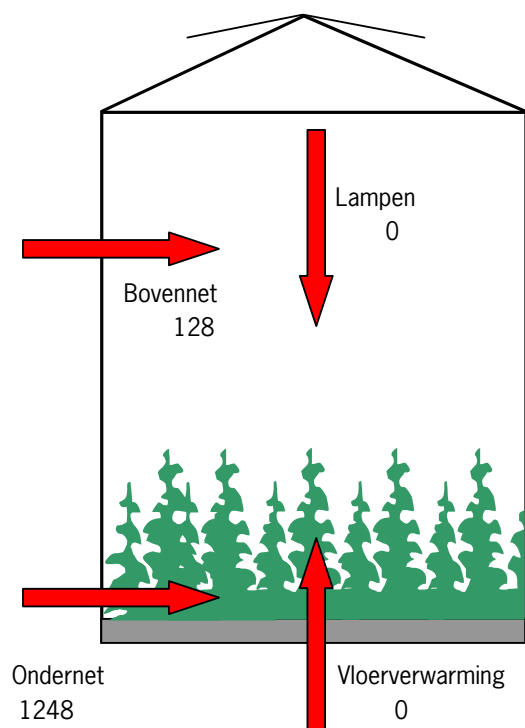
Er wordt in de standaardteelt geen temperatuurintegratie toegepast. Verder wordt er ook geen gebruik gemaakt van 'minimum raamstanden'.

8.2 Berekeningen van energiegebruik van referentieteelten

Om te bepalen wat de effecten zijn van de aanpassingen van het verwarmingssysteem op het gewas en het klimaat, zijn in eerste instantie referentieberekeningen gemaakt voor de 3 gewassen (tomaat, roos en Spathiphyllum) die de verschillende gewasgroepen representeren. Vervolgens zijn de effecten op het gewas en op het kasklimaat weergegeven. Voor de gewaseffecten is ook indicatief aangegeven wat dit voor de productie en kwaliteit zou kunnen betekenen.

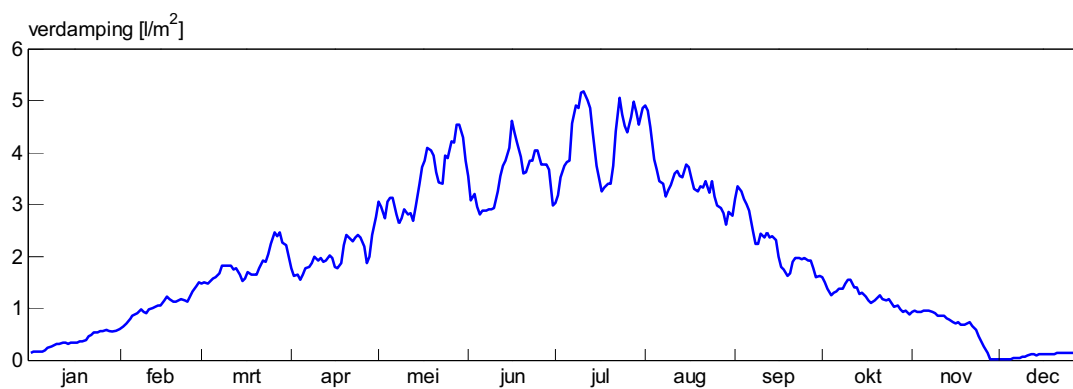
8.2.1 Referentieteelt tomaten

Zoals in paragraaf 8.1.1 is beschreven wordt er in de referentieteelt van tomaten gebruik gemaakt van twee verwarmingsnetten. De groeibuis (bovennet in Figuur 8.1) is een passief systeem dat op de condensor is aangesloten en alleen actief gestookt wordt als het ondernet te weinig capaciteit heeft om aan de warmtevraag te voldoen. In Figuur 8.1 is de energie-input van beide verwarmingssystemen weergegeven. Het ondernet brengt 91% van de totale warmtebehoefte in de kas. Het totale jaargebruik is berekend op 42,2 m³ m⁻².

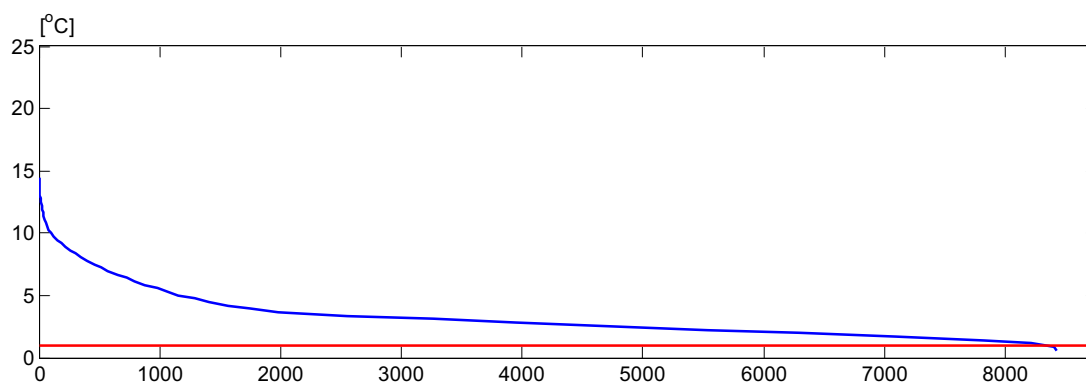


Figuur 8.1. Energiebronnen (gesimuleerd verbruik in MJ m^{-2}) voor een referentieteelt van tomaat.

De plaats en het soort van warmteafgifte (verhouding tussen straling en convectie) kunnen veel invloed hebben op de gewastemperatuur en daarmee ook op de verdamping van het gewas. In Figuur 8.2 is de dagelijkse verdampingsom als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen weergegeven. Op jaarbasis is de verdamping berekend als 738 liter m^{-2} .



Figuur 8.2. De gesimuleerde dagelijkse verdampingssom voor de referentieteelt van tomaat, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.



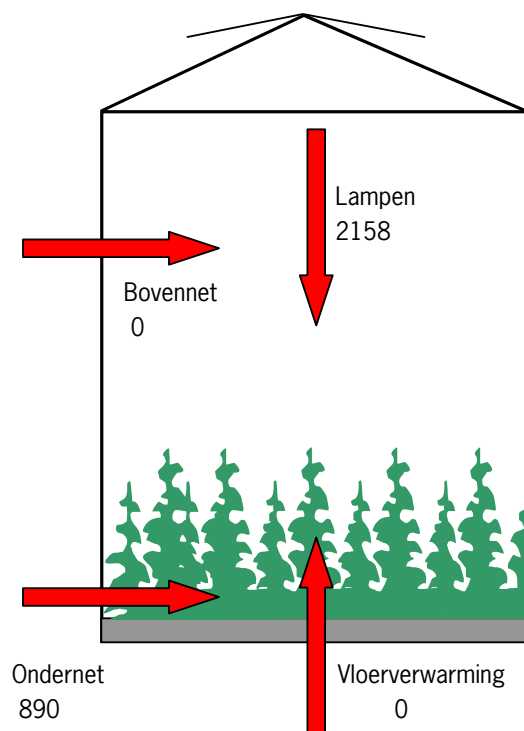
Figuur 8.3. Frequentie (uren) van het verschil tussen de gesimuleerde gewastemperatuur en dauwpunttemperatuur van de kaslucht voor de referentieteelt van tomaat.

Beïnvloeding van de gewastemperatuur betekent ook dat de kans op natslag wordt beïnvloed. Om dit te tonen, is in Figuur 8.3 een jaarbelastingduurkromme gegeven van het temperatuurverschil tussen de planttemperatuur en de dauwpunttemperatuur van de kaslucht, waarbij de berekende verschillen zijn geordend van hoog naar laag. Daalt de gewastemperatuur onder de dauwpunttemperatuur van de kaslucht, dan zal het gewas natslaan. In Figuur 8.3 zijn de gegevens tijdens de teeltwisseling niet meegenomen, waardoor er berekende waarden zijn voor 8424 uur in plaats van 8760 uur (365 dagen x 24 uur). Er is slechts een beperkt aantal uren (ca. 120 uur) dat de afstand minder dan 1 °C bedraagt en een potentieel gevaar oplevert voor natslag. De rode lijn geeft de grens van 1 °C weer.

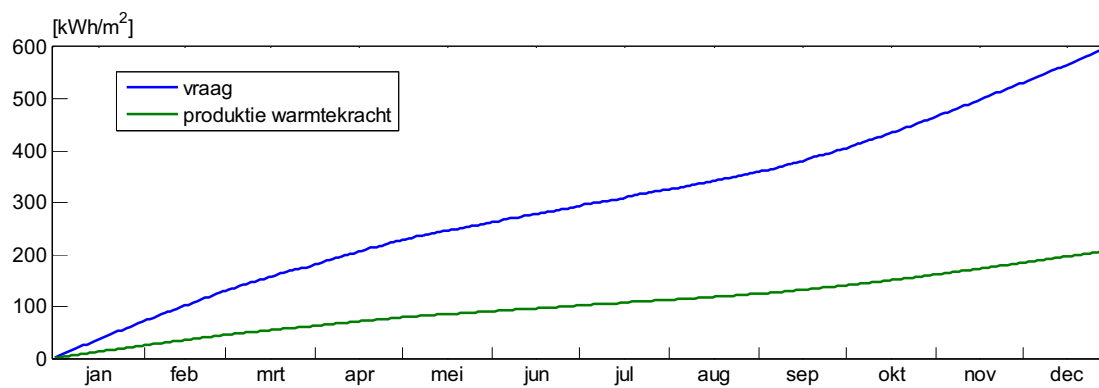
Een verwarmingssysteem dat het verschil tussen gewastemperatuur en de direct omringende kasluchttemperatuur weet te vergroten, zal er voor zorgen dat de kans op natslag verkleind wordt. Hierbij moet niet uit het oog verloren worden dat het gewas een sterke terugkoppeling heeft door de verdamping. Stel dat met een verwarmingssysteem lokaal de gewastemperatuur verhoogd wordt. Dan zal het gewas dit proberen te compenseren door extra water te verdampen. Deze extra verdamping zorgt vervolgens weer voor afkoeling van het betreffende gewasdeel, maar ook voor meer vocht in de kas waarmee een vochtprobleem gecreëerd kan worden. De verdamping (Figuur 8.2) en de gewastemperatuur zullen dan in een nieuw evenwicht komen.

8.2.2 Referentieteelt roos

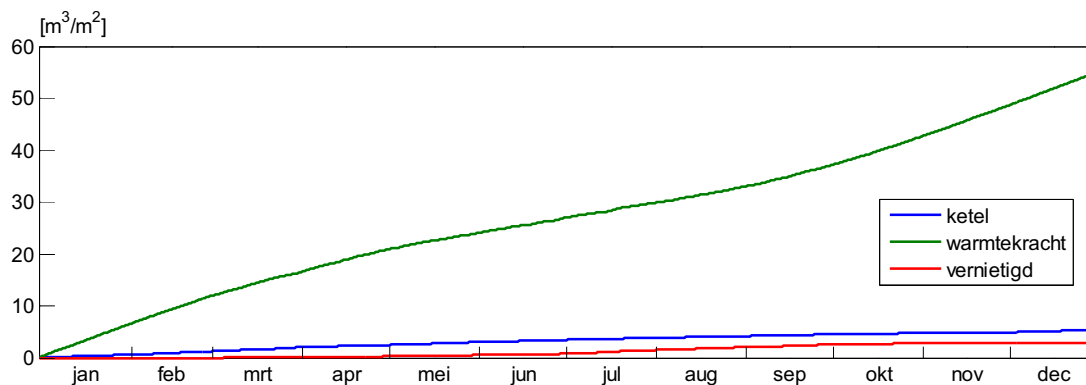
Zoals in paragraaf 8.1.2 is beschreven is er in deze referentieteelt naast de assimilatiebelichting slechts 1 verwarmingsnet, dat als ondernet in Figuur 8.4 is aangegeven. De condensor van de ketel is aangesloten op dit verwarmingsnet. Nu zal de ketel niet vaak hoeven bij te komen gezien het grote geïnstalleerde elektrische vermogen van de assimilatiebelichting. In Figuur 8.4 is de energie-input van de lampen en het ondernet weergegeven. Het ondernet brengt ruim 29% van de totale warmtebehoefte in de kas. Om energievernietiging zoveel mogelijk te voorkomen is er voor gekozen een warmtekrachtinstallatie te gebruiken met een beperkt vermogen en de rest van de elektriciteit in te kopen. In Figuur 8.5 is de cumulatieve elektriciteitsproductie van de eigen warmtekrachtinstallatie en de elektriciteitsvraag van de lampen weergegeven. Op jaarbasis wordt met de eigen warmtekrachtinstallatie 208 kWh m² aan elektriciteit geproduceerd op een totale vraag van 600 kWh m². Er zal dan ook nog 392 kWh m² moeten worden ingekocht.



Figuur 8.4. Energiebronnen (gesimuleerd verbruik in MJ m^{-2}) voor een referentieteelt van roos.

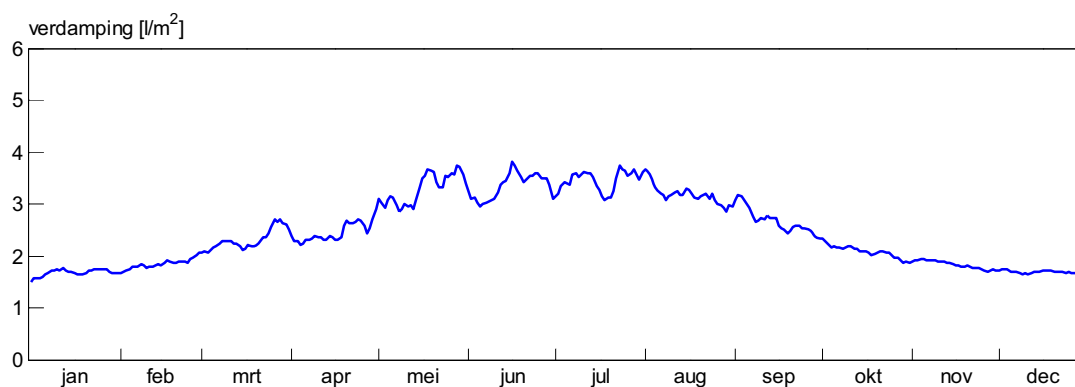


Figuur 8.5. Gesimuleerde cumulatieve elektriciteitsproductie van de warmtekrachtinstallatie en de elektriciteitsvraag van de lampen voor een referentieteelt van roos.



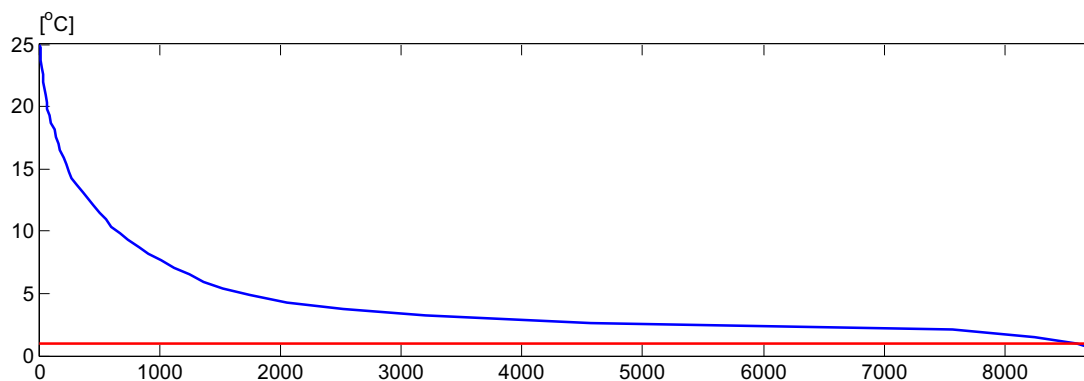
Figuur 8.6. Gesimuleerd cumulatief gasgebruik van de warmtekrachtinstallatie en de ketel en de vernietigde warmte voor de referentieteel van roos, teruggerekend naar m³ aardgas.

In Figuur 8.6 is het cumulatieve gasgebruik van de warmtekrachtinstallatie en de vernietigde warmte teruggerekend naar m³ aardgas weergegeven. Warmtevernietiging vindt plaats als de lampen aan moeten als de buffertank vol is. In totaal is het jaargebruik van de warmtekrachtinstallatie 55 m³ m² en van de ketel 5,3 m³ m². Daarbij is er 2,9 m³ m² vernietigd en moet er ook nog 392 kWh m² worden ingekocht.



Figuur 8.7. De gesimuleerde dagelijkse verdampingssom van een referentieteel van roos, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

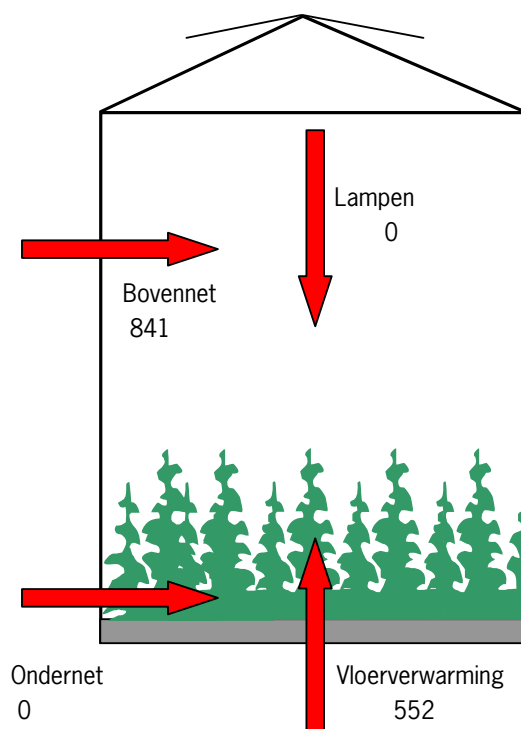
In Figuur 8.7 is de dagelijkse verdampingssom voor een referentieteel van roos als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen weergegeven. Op jaarbasis is de verdamping ongeveer 908 liter m².



Figuur 8.8. Frequentie (uren) van het verschil tussen de gesimuleerde gewastemperatuur en de dauwpunttemperatuur van de kaslucht van een referentieteelt van roos.

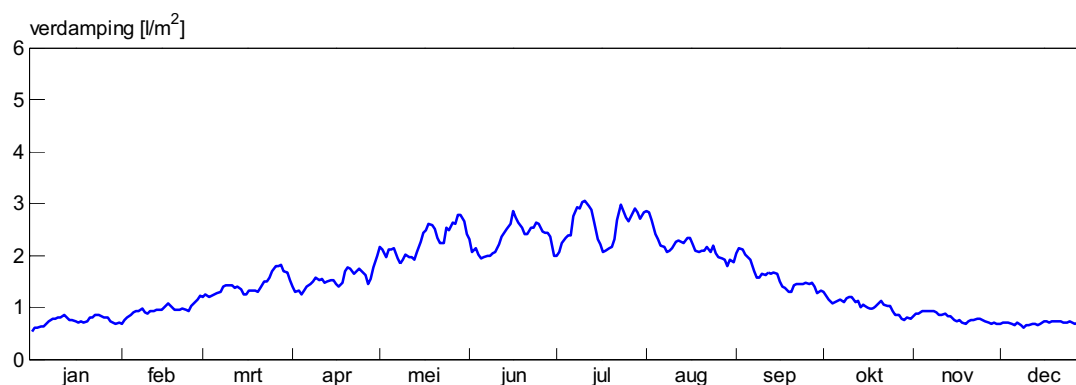
Als de gewastemperatuur beïnvloed wordt betekent dat ook dat de kans op natslag wordt beïnvloed. Om dit te tonen is in Figuur 8.8 een jaarbelastingduurkromme weergegeven van het temperatuurverschil tussen de planttemperatuur en de dauwpunttemperatuur van de kaslucht. De berekende waarden zijn geordend van hoog naar laag. Omdat de rozenteelt jaarrond is, zijn er 8760 waarnemingen (365 dagen x 24 uur). De rode lijn geeft de grens van 1 °C weer. Er is ongeveer 200 uur een verschil van minder dan 1 °C tussen de gewastemperatuur en de dauwpunttemperatuur van de kaslucht, die overeenkomt met de situatie waarin de kans op natslag een potentieel gevaar zou kunnen opleveren.

8.2.3 Referentieteelt Spathiphyllum



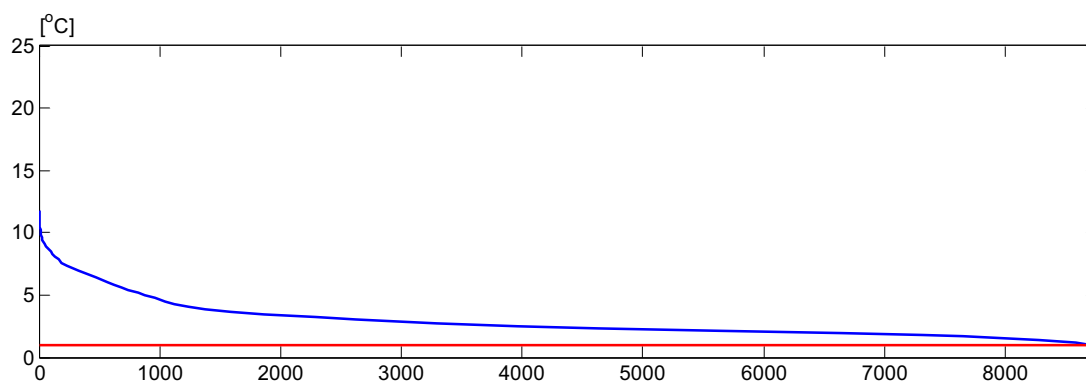
Figuur 8.9. Energiebronnen (verbruik in MJ m²) voor een referentieteelt van Spathiphyllum.

Zoals in paragraaf 8.1.3 is beschreven zijn er in de referentieteelt van *Spathiphyllum* twee verwarmingsnetten. Het primaire verwarmingsnet is de vloerverwarming. Daarnaast is er een bovennet (Figuur 8.9). De condensor van de ketel is aangesloten op de betonvloer. Dit is gedaan omdat de betonvloer een lage temperatuur heeft om de potten (lees wortels) niet teveel op te warmen. In Figuur 8.9 is de energie-input van beide verwarmingssystemen gegeven. Hoewel de vloerverwarming het primaire net is, wordt de meeste warmte door het bovennet in de kas gebracht. De vloerverwarming brengt ongeveer 40% van de totale warmtebehoefte in de kas. Het totale jaargebruik van de referentieteelt bedraagt $42,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$.



Figuur 8.10. De dagelijkse verdampingssom van een referentieteelt van Spathiphyllum, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

In Figuur 8.10 is de dagelijkse verdampingssom van een referentieteelt van *Spathiphyllum* als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen weergegeven. Op jaarbasis is de verdamping ongeveer 554 liter m^{-2} .



Figuur 8.11. Frequentie (uren) van het verschil tussen de gewastemperatuur en de dauwpunttemperatuur van de kaslucht voor een referentieteelt van Spathiphyllum.

Voor potplanten geldt net zoals bij de andere gewasgroepen, dat de beïnvloeding van de gewastemperatuur ook de kans op natslag beïnvloedt. Om dit te tonen is in Figuur 8.11 een jaarbelastingduurkromme gegeven van het temperatuurverschil tussen de planttemperatuur en de dauwpunttemperatuur van de kaslucht. De berekende waarden zijn gerangschikt van groot naar klein. Omdat de *Spathiphyllum*teelt jaarrond is, zijn er 8760 waarnemingen ($365 \text{ dagen} \times 24 \text{ uur}$). Er is ongeveer 50 uur een verschil van kleiner dan 1°C tussen de gewastemperatuur en de dauwpunttemperatuur van de kaslucht gesignaleerd, die overeenkomen met situaties waarin de kans op natslag een potentieel gevaar zou kunnen opleveren voor het gewas.

8.3 De modelberekeningen in vogelvlucht

In de startfase van het project is een referentieteelt tomaat gedefinieerd (Bijlage 8.1). Deze teelt bevatte een standaard verwarmingssysteem bestaande uit buisverwarming, twee verwarmingsnetten: een buisrail en een groeinnet.

Door de gekozen setpoints, de kasuitrusting en de eigenschappen van de kas in combinatie met het buitenklimaat (*sel/jaar*) ontstaat een binnenklimaat met daarbij een gewastemperatuur. Deze gewastemperatuur die is berekend in de referentieteelt is vervolgens het uitgangspunt geweest voor cases met andere manieren om het gewas te verwarmen; in het vervolg INFUUS genoemd. Uitgangspunt hierbij is geweest om het gewas op gelijke temperatuur te brengen/houden als in de referentieteelt omdat bij een verandering van de gewastemperatuur een andere assimilatenstroom zou ontstaan die in dit project nu juist buiten beschouwing is gelaten. Immers doel was de veronderstelling te onderbouwen of het mogelijk is met een andere manier van verwarmen van het gewas energie te besparen. Het realiseren van een gelijke gewastemperatuur aan de referentieteelt is dan een logische stap.

Om een fysisch eenvoudige situatie te beschrijven wordt onderstaand een donkere periode (nacht) waarbij in één situatie het scherm niet en in het andere geval wel gesloten is verondersteld. Door het gelijke buitenklimaat zijn de buitenranden van het systeem gelijk van temperatuur.

In de referentie wordt het gewas in deze situatie opgewarmd door:

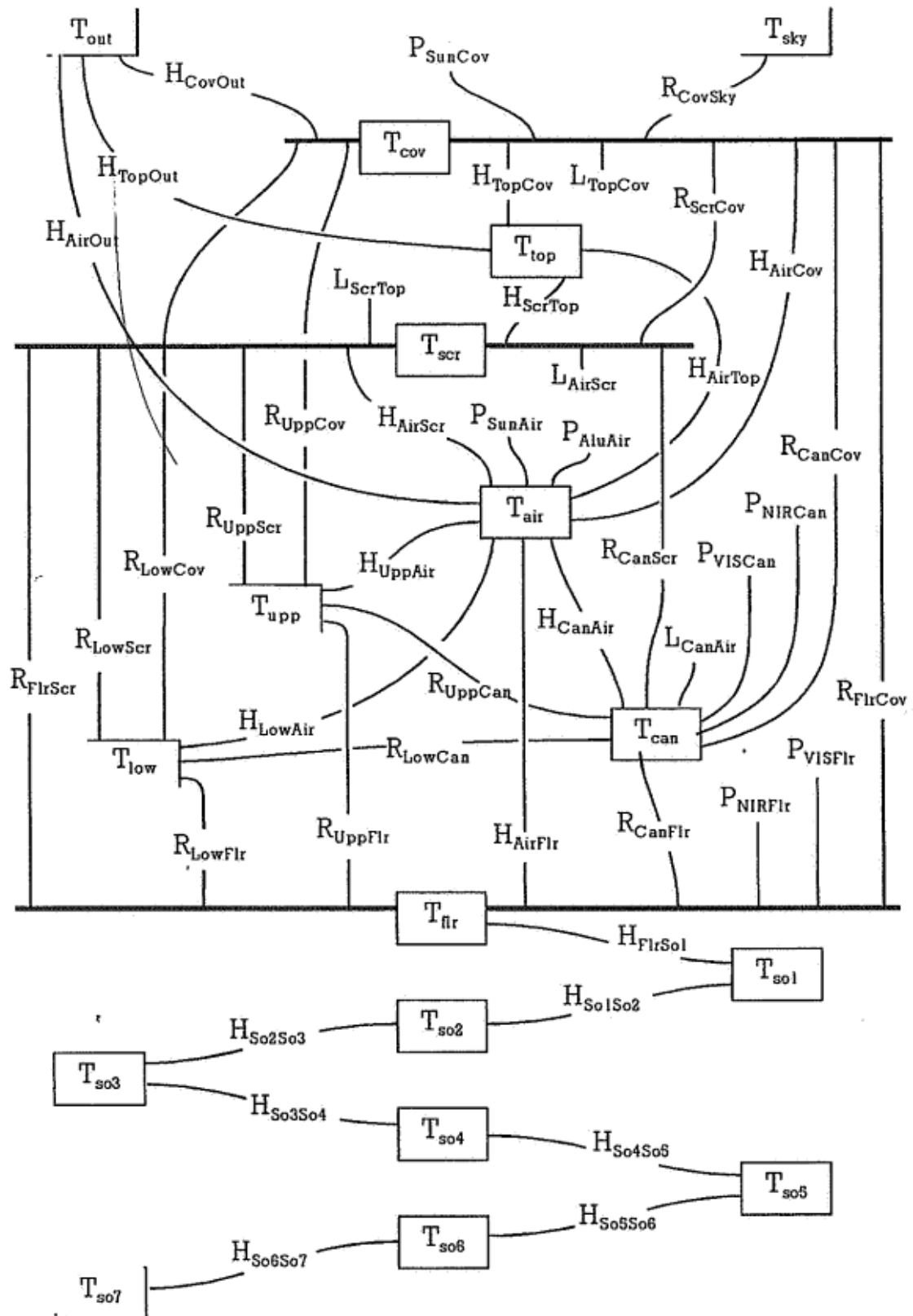
- de kaslucht (+) (convectie)
- straling van de verwarmingsbuizen (+) (beide netten)
- straling van de bodem (+) of (-)
- straling van het kasdek (-)
- straling van de lampen (+)
- verdampingsenergie (-) van het water dat de plant verdampt.

De (+) geeft aan dat de betreffende bron energie aan het gewas toevoert en (-) dat deze bron energie aan het gewas onttrekt. Zodra, op welke manier dan ook, één van de bronnen in dit evenwichtsspel verandert, zullen alle andere bronnen ook veranderen totdat er een nieuw evenwicht is ontstaan. Dit nieuwe evenwicht zal ontstaan omdat de buitenranden van dit systeem niet van niveau zullen veranderen. Binnen het systeem zullen dus juist alle niveaus veranderen. Dat dit een complex systeem is laat Figuur 8.12 zien, waar vrijwel alle systeemkoppelingen zijn gegeven waar rekening mee gehouden moet worden (zie Tabel 8.5 voor acroniemen en beschrijvingen).

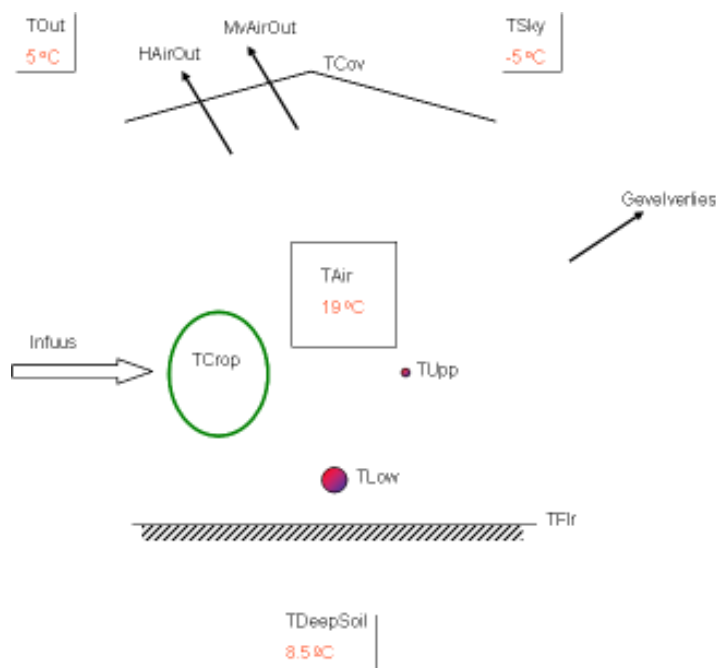
Tabel 8.5. Acroniemen en omschrijvingen van variabelen.

Acroniem	Omschrijving
TOut	Buitemtemperatuur
TSky	Hemeltemperatuur
TDeepSoil	Bodemtemperatuur op grotere diepte welke een vast seizoenspatroon volgt
TLow	Buistemperatuur van het ondernet
TUpp	Buistemperatuur van het condensornet
TCrop	Gewastemperatuur
TAir	Kasluchttemperatuur
TFlr	Bodemtemperatuur (Bovenste cm van de grond)
TCov	Dektemperatuur
TTop ¹⁾	Temperatuur boven het scherm
TScr ¹⁾	Temperatuur van het scherm
Infuus	Warmte die het energie infuus in de kas inbrengt
Gevelverlies	Energie welke door de gevel het systeem verlaat
HAirOut	Voelbaar warmteverlies t.g.v. de lek
MvAirOut	Latente warmteverlies t.g.v. de lek

¹⁾ deze twee temperaturen worden bij gebruik van het scherm toegevoegd.

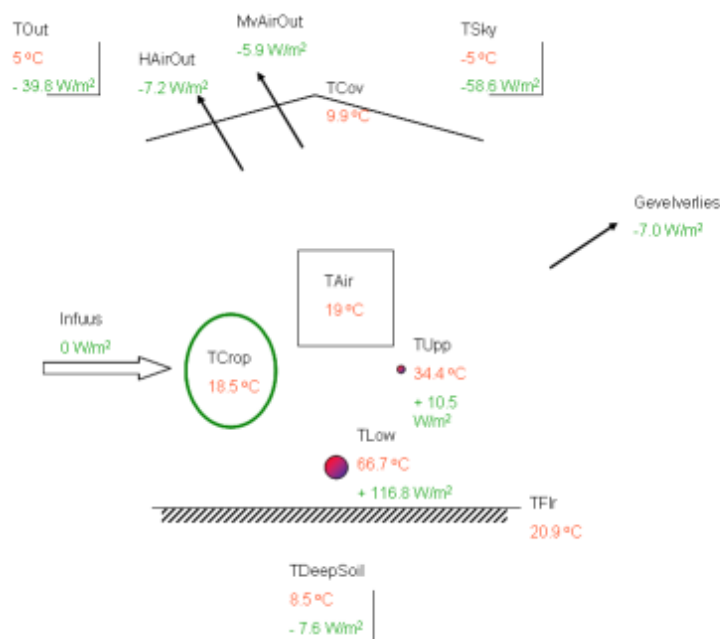


Figuur 8.12. Statusvariabelen, fluxen en omgevingsvariabelen in het gebruikte thermische model (de Zwart, 1996) Zie Tabel 8.5 voor acroniemen en omschrijvingen.



Figuur 8.13. Bronnen en verliesposten van het kasmodel.

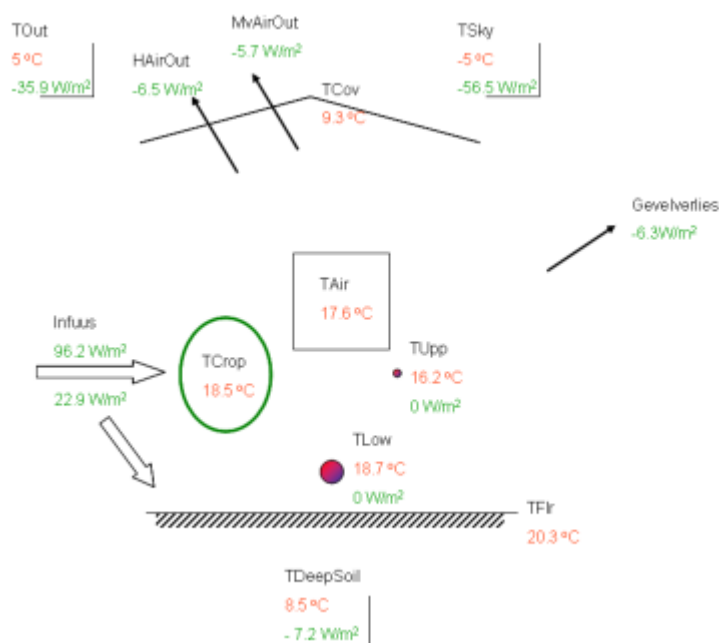
Omdat de omgevingsfactoren van het systeem gelijk zijn T_{Sky}, T_{Out} en T_{DeepSoil} moet de som van de fluxen van het gewas naar deze verliesposten gelijk worden. In een gebruikelijke situatie zijn deze 3 genoemde omgevingsfactoren dynamisch, immers het weer verandert in de tijd. Bij het uitwerken van deze vraag is er dan ook voor gekozen het dynamische gedrag van het model tijdelijk om te zetten in een statische situatie. In Figuur 8.13 is schematisch weergegeven welke randvoorwaarden en energiestromen in beschouwing zijn genomen. De resultaten van de referentieteeelt zonder scherm worden in Figuur 8.14 weergegeven.



Figuur 8.14. Energiestromen en temperaturen van de referentie situatie (zonder scherm).

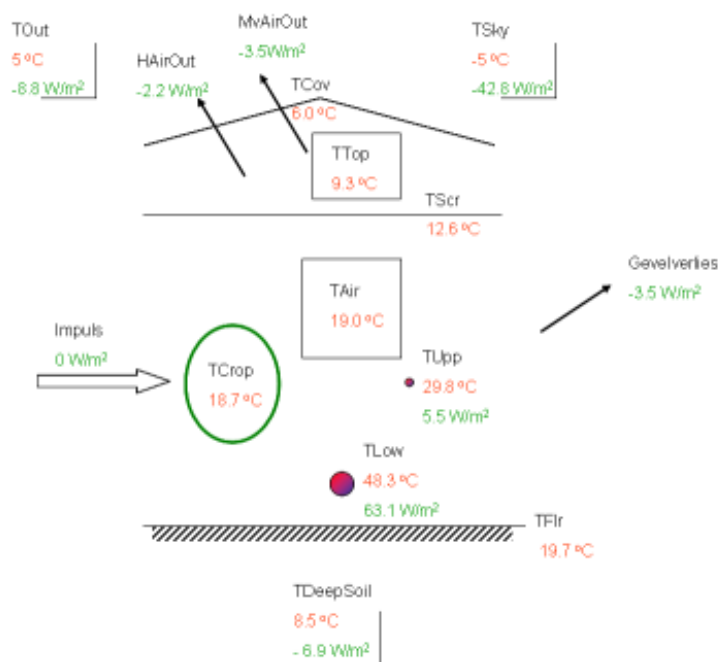
Na een aantal rekenstappen zonder dat de omgevingsparameters veranderen, ontstaat een steady state situatie. In Figuur 8.14 zijn temperaturen van de elementen zoals in Tabel 8.5 omschreven in het rood weergegeven. De bijbehorende fluxen in het groen. Vervolgens wordt de som van alle fluxen bepaald. De som van de input door de verwarmingsbuizen is $127,3 \text{ W m}^{-2}$ en de som van de verliezen is $125,9 \text{ W m}^{-2}$. De oorzaak van het niet in balans zijn van de input en de verliezen ligt in het kleine verlies naar de bodem. De bodemtemperatuur (TDeepSoil) is niet constant omdat deze één sinuscurve volgt afhankelijk van het jaargetijde. Hierdoor is van de gestelde steady state situatie net geen sprake. Bij een te realiseren kasluchttemperatuur van 19°C ontstaat een gewastemperatuur van $18,5^\circ\text{C}$. De meeste warmte wordt geleverd door het buisrailnet. De groeiverwarming (TUp) loopt als een autonoom net mee waar alleen condensorwarmte wordt ingevoerd. De stralingsverliezen naar de hemel vormen de grootste verliespost.

Voor de zelfde omstandigheden, is in de volgende case de buisverwarming uitgeschakeld en vervangen door het 'energie-infuus' zonder schermen. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 8.15. Bij een gelijke planttemperatuur als in de referentie situatie zonder scherm, blijft de luchttemperatuur duidelijk ($1,4^\circ\text{C}$) achter. Zoals uit Figuur 8.15 blijkt heeft dit ook gevolgen voor de temperaturen van alle andere parameters zoals de vloer en het kasdek. De som van de input door de verwarmingsbuizen is $119,1 \text{ W m}^{-2}$ en de som van de verliezen is $118,1 \text{ W m}^{-2}$. De oorzaak van het niet in balans zijn van de input en de verliezen is hiervoor al uitgelegd. Absoluut gezien wordt er bij het 'energie-infuus' dus iets minder energie in de kas gebracht (6%). De grote vraag hierbij is of dit als een besparing mag worden ingeboekt. Door de veranderde energiebron, ontstaat een ander kasklimaat. Hierdoor zal de klimaatregelaar veelvuldig ingrijpen op de bestaande situatie. Om tot deze steady state te komen, zijn alle regelinvloeden, welke meestal op vochniveau worden ingezet, op de ramen en buizen tijdelijk uitgeschakeld. In de situatie zoals in Figuur 8.14 ten opzichte van Figuur 8.15 weergegeven, zal de RV met ca 5% stijgen.



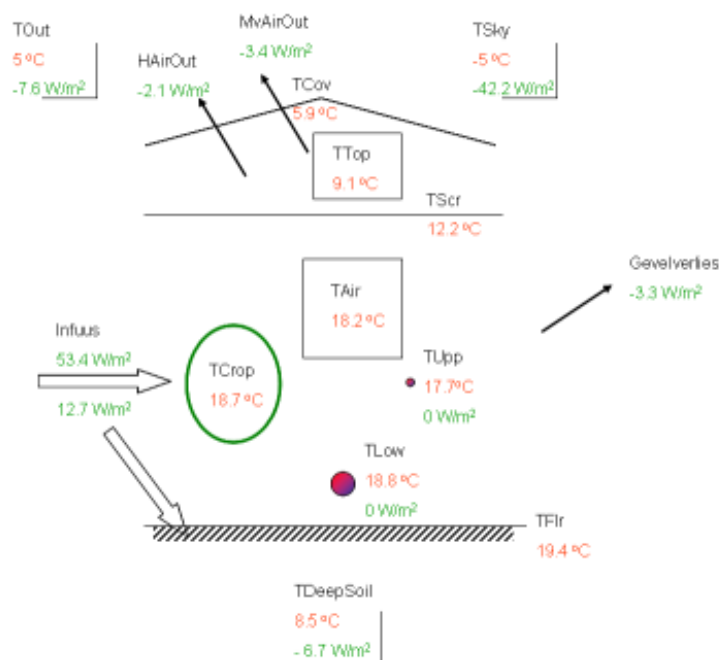
Figuur 8.15. Energiestromen en temperaturen van het 'energie-infuus' (zonder scherm).

In Figuur 8.16 en Figuur 8.17 zijn de voorgaande 2 cases herhaald maar dan met gebruik van een energiescherm, omdat bij de gegeven omstandigheden de inzet van een scherm een gebruikelijke actie is.



Figuur 8.16. Energiestromen en temperaturen van de referentie situatie met scherm.

De gewastemperatuur stijgt met 0.2 °C door het sluiten van het scherm. Doordat er een bovencompartiment is gecreëerd daalt de temperatuur in de nok van de kas (T_{Top}) waardoor de verliezen dalen. De som van de input door de verwarmingsbuizen is 68,6 W m⁻² en de som van de verliezen is 67,7 W m⁻². De onbalans wordt nog steeds veroorzaakt door de variatie van de T_{DeepSoil}.



Bij toepassing van het 'energie-infuus' (Figuur 8.17) daalt de kasluchttemperatuur veel minder dan in de situatie zonder scherm (18,2 °C in plaats van 17,6 °C). Ook de dektemperatuur daalt nu nog maar 0,1 °C. De som van de input door de verwarmingsbuizen is 66,1 W m⁻² en de som van de verliezen is 65,3 W m⁻². Het verschil in energiegebruik tussen de traditionele verwarming en het 'energie-infuus', is nu nog maar ca. 3%. Ook hier geldt wederom dat als alle invloeden die voor deze berekeningen zijn uitgeschakeld om tot een steady state te komen weer worden ingeschakeld dit verschil nog verder verkleind zal worden.

Conclusie

Toepassing van een 'energie-infuus' waarbij een flux direct 'ideaal' in het gewas kan worden ingebracht (zonder extinctieverliezen) is een theoretische benadering welke in de praktijk (nog) niet is voor te stellen. Deze theoretische benadering in combinatie met modelberekeningen maakt het toch mogelijk enige uitspraken te doen.

Toepassing van een 'energie-infuus' laat in een steady state situatie het energiegebruik wat dalen. In een extreme situatie zal dit op kunnen lopen tot 3 à 5%. De cases zoals getoond in Figuur 8.14 en 8-15 waar het scherm nog geopend is (waar deze in de praktijk al gesloten zou zijn), laat de bovengrens zien. Bij sluiting van het scherm daalt de besparing tot zo'n 3%. Bij een vertaling van deze theoretische benadering naar een meer praktijkgerichte situatie (het loslaten van de steady state) zullen deze verschillen verder vereffend worden. Deze besparing geldt als alle regelfactoren waar in de praktijk gebruik van gemaakt wordt, zijn uitgeschakeld. Met name de vochtregeling zal ervoor zorgen dat de verschillen verder worden opgeheven en eventueel om kunnen keren. Dit blijkt ook uit Hoofdstuk 4.1 zoals beschreven in dit rapport, waarbij de referentie in de winter een iets lager verbruik laat zien. Het verbruik in de zomer wordt grotendeels bepaald door de eerder genoemde regelfactoren waardoor er geen verschillen meer ontstaan.

Het feit of er wel/geen meer/minder energie bespaard kan worden, hangt voornamelijk af van conclusie 3 uit het rapport: 'Indien de gemiddelde gewastemperatuur verlaagd kan worden zou dit kunnen leiden tot energiebesparing'.

8.4 Populaire publicaties

Groenten en Fruit

Boonekamp, G.,

Paprika : 'We zijn in al die jaren onderzoek de helft vergeten'. Vakdeel glasgroenten : gespecialiseerd vakdeel bij Groenten + fruit 5, 14-15.

Buitelaar, K., 1985.

Matverwarming bij tomaten op steenwol. Groenten en fruit 40, 36-37.

Deenen, H., 1994.

Energie : verwarming gaat met zijn tijd mee. Vakdeel glasgroenten : gespecialiseerd vakdeel bij Groenten + fruit 4, 26-27.

Jasperse, H., 1995.

Paprika : wortels spelen grote rol bij afwijkingen. Vakdeel glasgroenten : gespecialiseerd vakdeel bij Groenten + fruit 5, 16-17.

Kempkes, F., 1996.

Klimaat : plaatsing groeibuis beïnvloedt temperatuur. Vakdeel glasgroenten : gespecialiseerd vakdeel bij Groenten + fruit 6, 22-23.

Klapwijk, D., 1984.

Effect worteltemperatuur op groei. Groenten en fruit 39, 31-32.

van Gastel, T., 2001.

Elektrische matverwarming moet meerwaarde nog bewijzen. Vakdeel glasgroenten : gespecialiseerd vakdeel bij Groenten + fruit 10-11.

Verkerke, W. en J. Janse, 1998.

Tomaat : lengtescheuren steken de kop weer op. Vakdeel glasgroenten : gespecialiseerd vakdeel bij Groenten + fruit 8, 16-17.

Visser, P., 2003.

Plantsensoren waken over teelt : klimaat. Groenten + fruit : weekblad voor de voedingstuinbouw. Algemeen 28-29.

Onder Glas

Arkesteijn, M., 2005.

Vijf tot tien procent energie besparen met kunsttomaat: natslaan van tomaat is beter in te schatten. Onder glas 2, 38-39.

Oogst

Persoon, J., 1993.

Matverwarming: een 'verzekering' bij paprikateelt. Oogst : CLO-land en tuinbouwblad 6, 10-11.

Vakblad voor de bloemisterij

Bakker, J.A., 1996.

Verkeerde worteltemperatuur brengt roos uit evenwicht. Vakblad voor de bloemisterij 51, 39.

Bloemhard, C. en F. Kempkes, 1997.

Chrysanten staan deels in de kou : op welke lucht- of gewas temperatuur wordt er geregeld? Vakblad voor de bloemisterij 52, 47.

Cuijpers, L. en J. Vogelesang, 1990.

Geen effect luchtvochtigheid en worteltemperatuur aangetoond : onderzoek naar verdroogde groeipunten bij Spathiphyllum. Vakblad voor de bloemisterij 45, 60-61.

de Dood, J., 1989.

Substraat- en luchttemperatuur beïnvloeden produktie niet : roos 'Madelon' op steenwol. Vakblad voor de bloemisterij 44, 44-47.

Nederpel, W.A.C. en H. van de Spek, 1983.

Rol van gewasverwarming in energiebesparing Gerbera. Vakblad voor de bloemisterij 46, 34-35.

van Harten, J., 1986. Goede aanleg en onderhoud matverwarming loont zich. Vakblad voor de bloemisterij 41, 71.

van Harten, J., 1989.

Gewasverwarming voor klimaatregeling tussen gewas. Vakblad voor de bloemisterij 44, 95.

van Holsteijn, S., 1986.

Gasverbruik bij anjers sterk terug te brengen : zes jaar ervaring met gewasverwarming. Vakblad voor de bloemisterij 41, 42-46.

van Os, P.C., 1986.

Hoge mattemperatuur heeft negatieve gevolgen bloemkwaliteit : oriënterende proef met matverwarming bij Gerbera op steenwol. Vakblad voor de bloemisterij 41, 46-47.

Vegter, B., 2002.

Elektrische mat heeft meer praktijkervaring nodig : potplanten - matverwarming. Vakblad voor de bloemisterij 57, 87.

Verdegaal, J., 1984.

Temperatuur gewasverwarming niet begrenzen. Vakblad voor de bloemisterij 39, 24-25.

Vakblad voor de intensieve tuinbouw

Anonymous, 1982.

Vruchttemperatuur meten. De tuinderij [: vakblad voor de intensieve tuinbouw] 62, 48-49.

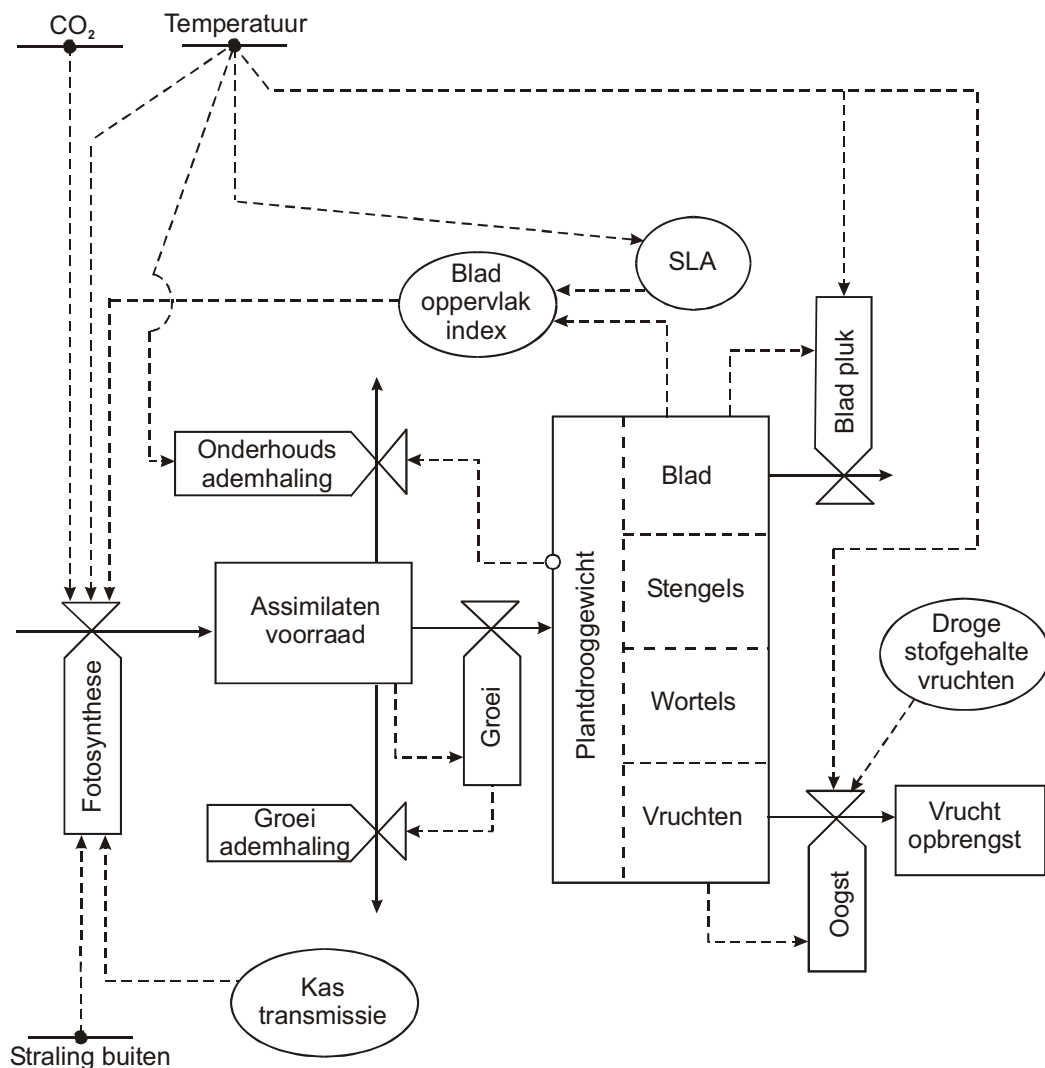
van de Sande, J., 1990.

Matverwarming hetelucht komkommers : worteltemperatuur beïnvloedt vroege produktie nauwelijks. De tuinderij [: vakblad voor de intensieve tuinbouw] 70, 60-61.

van Harten, J., 1989.

Gewasverwarming slechts hulpmiddel. De tuinderij [: vakblad voor de intensieve tuinbouw] 69, 29.

8.5 Relatiediagram temperatuursinvloed op de groei van een kasgewas



Figuur 8.18. Vereenvoudigd relatiediagram van de invloed van temperatuur op een vruchtgroentegewas in de kas. Rechthoeken zijn toestandsgrootheden, cirkels en ellipsen zijn parameters en kranen geven snelheden weer. Doorgetrokken lijnen geven stroom van koolstof weer, onderbroken lijnen geven informatiestroom of effecten weer. SLA = specifiek bladoppervlak (Bron: Dieleman en Heuvelink, 2005).

